

双腕アームロボットによる布被覆作業に関する研究

林 直宏

電気通信大学大学院 情報システム学研究科
博士(工学)の学位申請論文

主任指導教員 工藤 俊亮 准教授
指導教員 末廣 尚士 教授
指導教員 阪口 豊 教授

2016年12月

双腕アームロボットによる布被覆作業に関する研究

博士論文審査委員会

主査	工藤 俊亮	准教授
委員	栗原 聡	教授
委員	阪口 豊	教授
委員	末廣 尚士	教授
委員	野嶋 琢也	准教授

著作権所有者

林 直宏

電気通信大学
2016年

Studies on the fabric wrapping operation

by a dual-arm robot

Naohiro Hayashi

Abstract

The purpose of this study is to establish a model of the wrapping-with-fabric task and to perform the wrapping task by a robot.

This paper proposes to model the wrapping-with-fabric task based on the concept of “target lines.” Based on the model, a human provides rough wrapping instructions. The system then plans the wrapping operation from the shape of the fabric and the object, and generates the robot motion. Finally, the task is performed by a robot.

Although several factories have been robotized, many tasks cannot be robotized currently. Such tasks are too complex and delicate. They can be performed only by a human or can be performed more effectively by a human than a robot. One such task is the handling of fabric. A robot cannot perform this task because fabric deforms in a complex manner, and therefore, the fabric shape cannot be simulated and measured accurately.

Until now, for realizing the fabric handling task by a robot, following topics have been studied.

- a) Recognition of the shape and the transformation state of fabric
- b) Manipulation of fabric
- c) Manipulation of a fabric sample and an object in combination

The performance of three-dimensional measurement sensors and computers has increased in the recent years. This has facilitated shape recognition studies (labelled as topic a above). Progress in shape recognition research has intensified studies related to fabric manipulation operations, such as unfolding and folding (topic b). Research into combined manipulation of a fabric sample and an object (topic c) is the next step in this progression. Such research is necessary for the automation of tasks that require interaction between a fabric sample and an object, such as wrapping and winding. The expression of the relation between a fabric sample and an object is an important problem to solve when considering their combined manipulation. Studies in topic c are fewer than those in topics a and b. In view of this background, the current study is in topic c.

This study investigates the wrapping-with-fabric task by a robot. It focuses on the following subjects.

- A method for appropriately describing the relation between a fabric sample and an object
- A method for an intuitive instruction of the wrapping operation
- A method for generating robot motion from the description

First, this study proposes a method for appropriately describing the wrapping state. To design a general model of the wrapping-with-fabric task, describing the state of wrapping is the most important step. As the description method, this study introduces target lines, which are used in computer graphics. The target lines can be used to describe instruct wrapping on not only plane surfaces but also curved surfaces. For the description of wrapping on concave and curvature surfaces, this study proposes the concept of “local convex” and a method for generating the local convex.

Second, this study proposes a method for the intuitive instruction of the wrapping operation. For the intuitive instruction, this study uses the movement of a human hand. By using a teaching device created in this study, the proposed instruction method can extract the intention of wrapping from a rough movement. Then, the intention is described using target lines. Instead of focussing on an accurate three-dimensional trajectory of the hand, this instruction method focuses on the relation between the trajectory and the object surface that the trajectory is going to pass. Moreover, for reducing the effect of shaking of the hand, this study proposes a correction method for target lines.

Finally, this study proposes a method for generating robot motion from target lines. For execution of wrapping by actual robots, they require not only the description of the target lines but also hand paths and robot commands. When a robot handles fabric, it needs consideration of the range of motion and collisions. For overcoming such limitations, the robot needs to use inter- and intra-hand passing of fabric. For the generation of these hand paths and robot commands, target lines specify the essence of wrapping, so the generation methods can design both hand paths and robot commands freely. Moreover, this study proposes a planning method based on the reliability of various robot movements. The planning method generates a movement transition graph of the robot based on the reliability of movements. Then the method can plan an optimum combination of inter- and intra-hand passing to generate the basic movements of wrapping.

This study integrates the above methods into a complete fabric wrapping robot system. From the rough wrapping instruction of a human, the system describes the wrapping state using target lines. Then, from the target lines, the hand paths that describe the fabric movement are generated. Finally, from the hand paths, the robot commands as a combination consolidation of inter and intra-hand passing are generated.

By using the proposed model, an actual robot successfully performed the wrapping operation. This study confirmed that the model is effective in describing the wrapping operation by robots.

双腕アームロボットによる布被覆作業に関する研究

林 直宏

概要

本研究の目的は、物体を布で包む作業（被覆作業）をモデル化し、ロボットによる被覆作業を実現させることである。本論文では「目標線」の概念に基づいて物体を布で包む作業（被覆作業）をモデル化することを提案した。これにより、まず人間が大まかな包み方を教示し、次に布と物体の形状から被覆作業を計画し、最終的にロボットの動作を生成し、ロボットによる被覆作業を実現した。

近年、工場のロボット化が行われているが、ロボット化できない作業はまだ存在している。それらは、人間にしか行えないような巧みで複雑な作業、あるいは、ロボットより人間の方が効率的にできてしまうような作業である。そのような作業の1つとして、布を扱う作業が挙げられる。布を扱う作業の中には、布単体だけでなく、物体も一緒に取り扱っていく被覆作業が多く存在している。しかし、この被覆作業をロボットに指示するための有効な作業モデルは確立されていない。

先行研究では、ロボットによる布操作の記述方法として、点、折り線や手先経路が用いられている。また、コンピュータグラフィクス分野では目標線という記述方法があり、これは被覆を表現するために用いられている。被覆作業をロボット化する上では、まず、実世界のロボットのために、汎用的な被覆モデルとして必要となる物体と布の関係や作業手順を、どのように記述すればいいのかという問題に直面する。このような点を考慮し、被覆作業に適した記述モデルを導入しなければならない。次に、そのような被覆のための作業記述を、実際のロボットにどのように入力すればいいのかという問題がある。煩雑な指示方法ではなく、実空間上で人間が考えている被覆作業を、直感的にロボットに指示できるのが望ましい。最後に、その作業記述から実際のロボットの動きをどのように生成すればよいかという問題が現れてくる。ロボットが被覆作業を達成するためには、実際の手先軌道や干渉を回避するための動作を、状況に合わせて生成しなければならない。

以上を踏まえて、本研究ではロボットによる被覆作業の課題に取り組んだ。具体的には以下の課題について取り組んだ。

- ・ 布と物体の関係を適切に表す記述方法
- ・ 直感的な被覆手順の指示方法
- ・ ロボットの動作軌道の生成方法

まず、布と物体の関係を適切に表す記述方法について検討した。本研究では、コンピュータグラフィクス分野で用いられた目標線という記述方法を、実空間のロボットに導入することを提案した。この目標線は平面だけでなく曲面形状への指示が行いやすい。そして、物体のどこ

を布で包んでいくかという被覆の本質的な情報を自然に表せる利点を持つ。その中では、凹凸が存在するような物体に対しても被覆を行う場合があり、その凹凸を適切に処理して、作業を記述する必要がある。そこで、物体の埋めるべき凹部と埋めるべきでない凹部分を考慮し、凹凸へ適切な目標線指示を行うための局所凸という概念、及び局所凸生成方法を提案した。

次に、直感的な被覆手順の指示方法について検討した。本研究では、人間のたまかな包む指示と被覆の関係を考え、物体と布のどこを重ね合わせるかという人間の被覆の意図を目標線として入力する方法を提案した。本研究は、作業指示を行う手の正確な3次元的な軌跡ではなく、手の軌跡とその軌跡が通過していく物体表面の関係に注目した。そして、デプスセンサとモーションキャプチャセンサを組合せた教示デバイスを用いて、人間の被覆の意図を抽出した。その中では、指示中の手振れの影響を小さくするための目標線逆走防止処理手法とスムーズングと間引き処理を合わせた補正処理手法を提案した。

最後に、ロボットの動作軌道の生成方法について検討した。本研究では、目標線と把持点から布の動きを表す手先経路を生成する方法と、その手先経路を実行するためのロボット動作の生成方法を提案した。実際のロボットを動かすためには、目標線だけでなく、手先経路や動作指令が必要であり、可動域や物体との干渉を考慮し、右手と左手を用いた布の持ち替えや持ち直しを行わなければならない。これらの情報を生成する上で、目標線が被覆の本質的な情報を保持している。そのため、手先経路・動作指令は自動的に生成可能である。動作生成手法の中では、各操作の布への重力の影響、動作ステップ数やロボットと布の位置関係を考慮した確実性を求め、それを基に生成された動作遷移グラフを用いて、最適な持ち替えや持ち直し操作の組み合わせを計画する方法を提案した。

以上、本研究では、物体を布で包むという被覆作業について、ロボット化のための枠組みを提案した。さらに、各課題に対する提案方法を統合し、一連の被覆作業システムとして実装した。これにより、実際に人間のたまかな指示から、目標線を用いて布と物体の関係を記述し、そこから布の動きを表す手先経路、状況に合わせた最適なロボット動作を生成できるようになりロボットによる被覆作業が実現した。

目次

第1章	序論	7
1.1	背景	7
1.2	関連研究	10
1.2.1	柔軟物の認識・操作について	10
1.2.2	柔軟物の記述方法について	12
1.3	研究目的	15
1.4	本論の章構成	18
第2章	被覆作業の記述方法	19
2.1	被覆作業の三階層モデル	21
2.1.1	インストラクションレベル	23
2.1.2	ハンドリングレベル	23
2.1.3	ロボットレベル	23
2.2	目標線	24
2.3	凹物体上での目標線	27
2.4	目標線指示の適応範囲	31
2.5	まとめ	31
第3章	目標線による大まかな指示の記述（インストラクションレベル）	33
3.1	教示方法	33
3.2	凹面への目標線指示	38
3.2.1	凹面への被覆指示	38

3.2.2	スキャンライン上での凸包処理	39
3.2.3	スキャンライン間での凸包処理	40
3.3	目標線の補正処理	42
3.4	実験	46
3.4.1	実験環境	46
3.4.2	目標線入力及び補正実験	50
3.4.3	補正処理のめり込み減少効果の評価実験	53
3.4.4	凹凸を考慮した被覆領域の生成	57
3.4.5	補正目標線を用いた手先経路の生成実験	59
3.4.6	大まかな指示を用いた被覆作業の記述	61
3.5	まとめ	64
第4章	ロボット動作の生成	65
4.1	目標線からの手先経路生成（ハンドリングレベル）	65
4.1.1	手先経路の生成方法	65
4.1.2	手先経路の補正処理	68
4.2	手先経路からのロボット動作の生成（ロボットレベル）	69
4.2.1	持ち替え・持ち直し操作	72
4.2.2	ロボットの動作計画手法	76
4.3	実験	89
4.3.1	ソフトウェア構成	89
4.3.2	実験環境	91
4.3.3	目標線を用いた被覆	93
4.3.4	凹凸を含む曲面形状への被覆	98
4.3.5	複数の目標線を用いた被覆	99
4.3.6	持ち替え・持ち直し操作	100

4.3.7	L字管への巻き付け操作	103
4.4	考察	109
4.5	まとめ	110
第5章	結言	111
5.1	謝辞	113

目 次

1.1	柔軟物を扱う作業	8
1.2	布と物体	9
1.3	布形状認識の研究 [10, 19]	11
1.4	布単体操作の研究 [29, 31]	11
1.5	CG分野で用いられてる目標線 [40, 41]	11
1.6	(a) 折り線 (b) 手先経路	12
1.7	柔軟物の記述方法の記述例	14
1.8	大まかな指示を用いた包み方の指示	16
1.9	サービス分野で用いられる双腕ロボット	17
1.10	産業分野で用いられる双腕ロボット	17
2.1	包み方の教示方法	20
2.2	被覆作業の中間表現	22
2.3	(a) 物体と布上に引かれた目標線 (b) 目標線どうしを重ねることによる被覆表現	24
2.4	物体と布上の目標線の関係	25
2.5	円柱に斜めに布を巻く場合	26
2.6	凹部分への被覆	27
2.7	Global convex hull	28
2.8	大域的な凹と局所的な凸	29
2.9	局所凸の定義	30
2.10	目標線による記述の適用範囲	32

3.1	物体上目標線の教示	34
3.2	物体上目標線座標系 T^0 の導出	35
3.3	目標線入力処理 (a) 間違っただ入力処理 (b) 正しい入力処理	36
3.4	物体上への目標線指示	37
3.5	布上への目標線指示	37
3.6	スキャンラインの凸包化	39
3.7	局所凸包化処理 (a) 初期の凹被覆領域 (b) 凸化された局所領域	40
3.8	目標線の物体内へのめり込み	42
3.9	スプライン曲線の射影 (a) スプライン処理による補正 (b) フィットラインへの射影 (c) 物体表面への射影	43
3.10	目標線の直線部分での手先経路の揺らぎ	45
3.11	教示デバイス (a) 外観 (b) 機能が割り振られているボタン	47
3.12	フィードバックディスプレイ	48
3.13	ソフトウェア構成	49
3.14	教示環境	50
3.15	補正処理の結果	52
3.16	角部分へのめり込み補正の結果例	54
3.17	曲面部分へのめり込み補正の結果例	55
3.18	めり込み補正の結果	56
3.19	シミュレーション結果 (a) 円柱 (b) 巻き方 (c) フィットライン群 (d) 局所凸包化処理の結果 (e) 生成された目標線 (f) 円柱の各部分 (g) フィットライン群の各部分 (h) 従来の凸包処理を用いた場合	58
3.20	手先経路生成の実験構成	59
3.21	手先経路の結果例	60
3.22	幅の狭い布による被覆 (a) 包み方 (b) 埋めるべき凹部分 (c) フィットライン群 (d) 凸化されたフィットライン群 (e) 目標線	62

3.23 幅の広い布による被覆 (a) 包み方 (b) 埋めるべき凹部分 (c) フィットライン群 (d) 凸化されたフィットライン群 (e) 目標線	63
4.1 把持点	66
4.2 手先経路生成	66
4.3 手先経路生成 (長方形以外の布の場合)	67
4.4 手先経路の補正処理	68
4.5 関節の可動域制限 (a) 例 1 (b) 例 2	70
4.6 持ち替えと持ち直し操作の概要	72
4.7 持ち替え操作	73
4.8 持ち直し操作 (a) 例 1 (b) 例 2	74
4.9 持ち替え・持ち直し操作時の制約条件 (a) 例 1 (b) 例 2	75
4.10 グラフの頂点 V の生成	79
4.11 手先経路を進む動作エッジ E_{forward} の生成	79
4.12 持ち替え操作エッジ E_{inter} と持ち直し操作エッジ E_{intra} の生成	80
4.13 仮想初期ノードと仮想目標ノードの生成	80
4.14 手先経路からのグラフ生成例	81
4.15 把持姿勢の変化量を評価する角度 θ^p	82
4.16 重力の影響を評価する角度 θ^g (a) ハンドの向きと布の弛み (b) θ^g の導出	83
4.17 ハンドとロボットの向きの影響を評価する角度 θ^{dir} (a) ハンドとロボットの向 きの関係 (b) θ^{dir} の導出	84
4.18 経路探索のアルゴリズム	88
4.19 ソフトウェア構成	90
4.20 Baxter	91
4.21 二指ハンド	92
4.22 机	92

4.23 (a) 水平に置かれた円柱（縦向き巻き付け） (b) 作成した目標線と生成された 手先経路	94
4.24 縦向き巻き付けの結果 (a) 正面 (b) 横	94
4.25 (a) 縦に置かれた円柱（横向き巻き付け） (b) 作成した目標線と生成された手 先経路	95
4.26 (a) 縦に置かれた円柱（斜め向き巻き付け） (b) 作成した目標線と生成された 手先経路	95
4.27 横向き巻き付けの結果 (a) タオル（巻き付けの終わり部分） (b) タオル（巻 き付けの途中部分） (c) テーブルクロス (d) 紙	96
4.28 斜め向き巻き付けの結果 (a) 全体図 (b) 巻き付けの開始部分 (c) 巻き付けの途 中部分 (d) 巻き付けの終わり部分	96
4.29 手先経路の補正結果 (a) 対象物体 (b) 比較結果	97
4.30 幅の狭い布による被覆 (a) 実験条件 (b) 目標線と手先経路 (c) 被覆結果	98
4.31 幅の広い布による被覆 (a) 実験条件 (b) 目標線と手先経路 (c) 被覆結果	98
4.32 箱への平包み (a) 包み方 (b) 目標線 (c) 1 操作目 (d) 2 操作目 (e) 3 操作目 (f) 結果	99
4.33 持ち替え操作の結果	101
4.34 持ち直し操作の結果	102
4.35 実験環境 (a) L 字管 (b) 目標線と生成された手先経路	103
4.36 ロボットに対する L 字管の向き (a) パターン 1 (b) パターン 2	103
4.37 経路計画の結果 (a) パターン 1 (b) パターン 2	105
4.38 巻き付け中の様子（パターン 1）	106
4.39 巻き付け中の様子（パターン 2）	107
4.40 巻き付け結果（パターン 1）	108
4.41 巻き付け結果（パターン 2）	108

表 目 次

1.1 柔軟物の記述方法の比較表	14
3.1 教示結果（標準偏差）	52
3.2 手先経路の結果（標準偏差）	59

第1章 序論

1.1 背景

近年，我が国は少子高齢による労働人口の減少に対応する必要があり，人間の代替，生産スピードの向上，コスト削減のため，生産現場のロボット化が増々望まれている．特に，人との協調作業，人間より高速・精確な作業を行うアームロボットは，様々な生産工場で要となる存在である．アームロボットによる物体を掴み移動させる操作は，生産現場での組立て作業などで幅広く利用され，それに伴う研究開発は現在まで活発に行われてきた [1-5]．

しかし，現在も生産現場での人間の作業を完全ロボット化することは達成できていない．それは，人間にしか行えない巧みで複雑な作業，あるいはロボットより人間の方が効率的にできてしまう作業が，まだまだ存在しているためである．このようなロボット化できない人間の作業の一つに，剛体ではなく，Fig. 1.1 に示すような布のような柔軟物を扱う作業が挙げられる．この柔軟物を扱う作業がロボット化できない理由として，複雑に変形したり，伸び縮みするため，センサーでの形状認識やシミュレーションでの形状予測が困難というのが挙げられる．また，近年，工場だけでなく生活環境へ，産業用ロボットとしてではなくサービス・福祉・パートナーロボットとして，マニピュレーション機能を有するロボットの普及も望まれている．このような生活環境で行われる人間の作業は，前述したようなロボット化が困難な柔軟物作業を多く含んでいる．従って，生産現場だけでなく生活環境へのロボットの普及を実現していくためには，柔軟物操作をロボット化する重要性は大きいと言える．

このような背景を踏まえ，本論文ではロボットによる柔軟物操作をテーマとして取り上げる．柔軟物に関する既存研究を見ると，柔軟物の形状認識，あるいは衣服の折り畳みのような柔軟物単体の操作の研究は活発化しているが，物体を布で包みこむような，物体と柔軟物



(a) 風呂敷包み [6]



(b) カーラッピング [7]



(c) テーピング [8]



(d) 着衣支援 [9]

Fig. 1.1: 柔軟物を扱う作業

のインタラクションがある研究 [37–39] は認識・単体操作の研究と比べて少ない。このような物体を布で包むという操作(被覆操作)は、認識・単体操作と同じく柔軟物に関する研究の中で重要な項目の一つであり、また、認識・単体操作がある程度確立してきた現状の中で、次に着手すべき課題である。このような研究動向に着目し、本研究では柔軟物操作に関する研究の中で、被覆操作のロボット化を目指す。

ある作業をロボット化する場合、必要な動作群をデータとして計算機上で扱いやすくするために、作業モデルを設計する必要がある。包む・巻く・被せるといった被覆作業では、平面形状の布が、物体の形状に合わせて変形して重なり、物体と布がまるで一つのようになる (Fig. 1.2)。ロボットのための汎用的な被覆作業モデルとして、被覆作業の根本的な

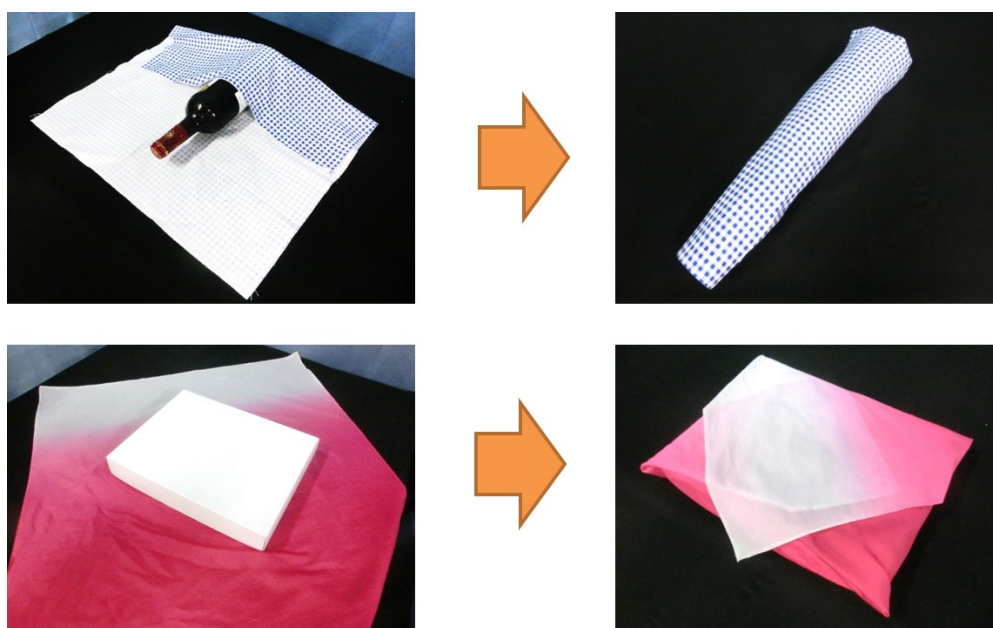


Fig. 1.2: 布と物体

関係である布と物体を，的確に表現することは重要である．そして，作業モデルとしては，布と物体の完成形のみならず，どのような関係の変化を経たか，理解しやすい形であるべきである．本研究はそれを達成するために，被覆の本質的な要素を抽出し，布と物体の関係が明示的な被覆作業モデルを作ることを大きな課題とする．

1.2 関連研究

本節では、まず、関連する柔軟物の認識・操作の研究について述べ、続いて、関連研究で用いられてきた柔軟物操作の記述方法について整理し、被覆操作として有効な記述方法を検討する。

1.2.1 柔軟物の認識・操作について

ロボット分野では、近年の3次元計測センサや計算機の向上に伴い、紐や布といった柔軟物の認識や、ロボットによる操作の研究が活発化している。認識の研究としては、Fig. 1.3のように画像情報や力覚情報から布や衣服の形状や把持点を探索する研究が行われている。画像データ中の布の端や皺の特徴量分類やパターン認識を用いた方法 [10–13]、3次元データ中の布の全体や局所領域形状の特徴量分類やパターン認識を用いた方法 [14–18]、これらの画像データと3次元データを組み合わせた方法 [19–21]、ロボットハンドの力覚データと画像・3次元データを組み合わせた方法 [22,23]、ロボットの布を持ち上げる操作と画像・3次元データを組み合わせた方法 [24–26]、の研究が挙げられる。

単体操作の研究としては、和田ら [27]の平面上での布の同時位置合わせ作業、柴和田ら [28]の布展開動作、Abbeelら [29,30]やAllenら [31]の衣服の折りたたみや、石川ら [32,33]の空中タオル折り畳み、リボン操作、Allenら [34]のアイロンによる布の皺取りが挙げられる (Fig. 1.4)。また、企業のセブン・ドリーマーズ社 [35]とFoldimate社 [36]からはそれぞれ、家庭用の洗濯物折り畳みロボットの発売が予定されている。被覆操作の研究としては、寺田ら [37]の箱への風呂敷包み、稲葉ら [38]、柴田ら [39]の人間への着衣支援などが挙げられる。

一方、コンピュータグラフィクス分野では五十嵐ら [40]はCG内の人形に布を巻く表現として、幸村 [41]らはCG内の物体の包装を表現として、Fig. 1.5のように、メッシュモデルで表現された布と物体に目標線という記述方法を用い、CG内での被覆方法を提案した。

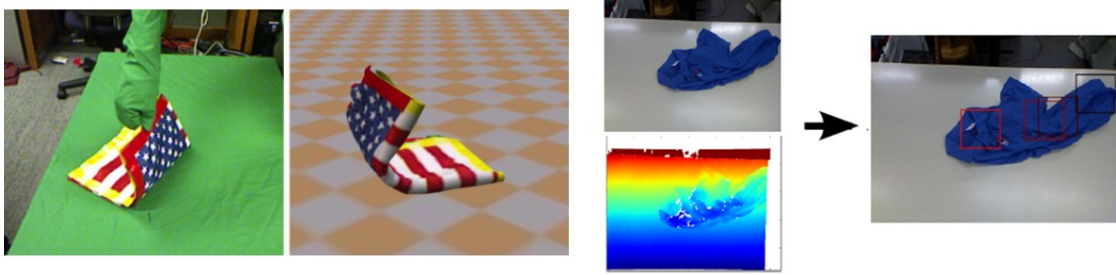


Fig. 1.3: 布形状認識の研究 [10,19]

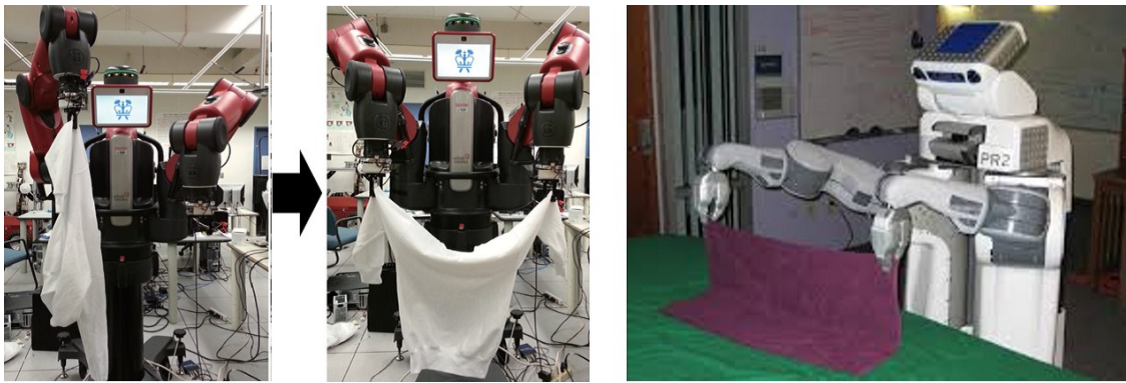


Fig. 1.4: 布単体操作の研究 [29,31]

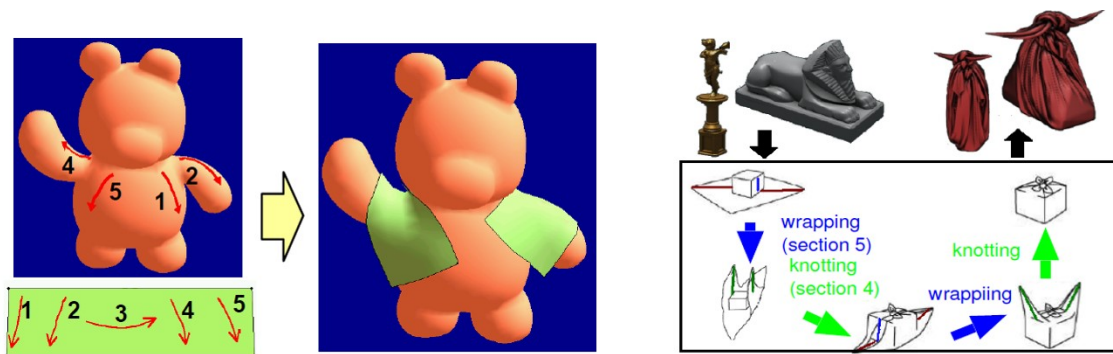


Fig. 1.5: CG 分野で用いられてる目標線 [40,41]

1.2.2 柔軟物の記述方法について

ここでは、関連研究の布操作のための指示の仕方(記述方法)について議論する。これまでの研究では、布被覆操作の記述に、ペアの点群 [27,28]、折り紙に用いられるような折り線 [29,30,37] や、布を持つ手先の経路 [38,39] が使用されている (Fig. 1.6)。しかし、様々な

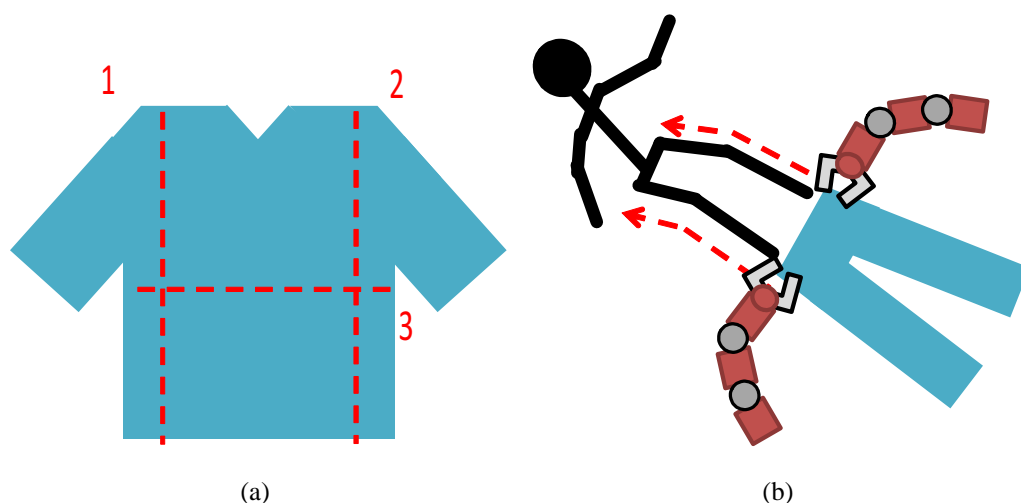


Fig. 1.6: (a) 折り線 (b) 手先経路

形状を持つ物体への被覆操作を考えた場合、点や折り線による記述では曲面物体の表面への指示を行うことが難しい。また、手先経路による記述では、逐一手作業により経路の座標を指定しなければならず、経路を作成する人間への負担が大きいと言える。このように、既存のロボットによる柔軟物操作に用いられてきた記述方法では、被覆操作の記述は十分にできないと言える。一方、第 1.2 節で述べたように、コンピュータグラフィックス分野では、目標線という記述方法が用いられていた。この目標線を用いた記述方法は、様々な物体形状への被覆操作の記述に有用と言える。なぜなら、他の記述と比べ、平面だけでなく曲面形状への指示も行いやすく、また、どのような流れで、物体のどこを包むかという被覆の本質的な目的を、自然に表すことができるためである。

これらの記述方法についてのまとめを Fig. 1.7 の被覆を例に、Table. 1.1 に示す。被覆作業の記述方法として必要なのは、物体と布が完成時にどのように重なっているか(関係性)、どのような順序で布を操作していくか(被覆の手順)を自然に表現することであると考える。

まず、各記述方法の関係性に注目すると、ペアの点による記述は、物体と布の表裏関係が記述されておらず、物体と布がどのように重なるか十分に記述されていない。折り線による記述は、あくまで布がどこで折れるかを表しているだけであり、物体との重なり方は記述されていない。手先経路による記述は、把持点が決めた後の布の動かし方のみが示めされているので、布と物体の重なり方の情報は記述されていない。また、把持点を変える場合、新たに手先経路を作り直す必要がある。それに対して目標線は、布と物体の重なり方を線のペアで明示的に記述することができる。

次に、各記述方法の被覆の手順に注目すると、ペアの点による記述は、被覆の1手順と複数の点の対応関係が表現されていない。折り線による記述は、被覆の1手順と複数の折り線の対応関係が表現されていない。手先経路による記述は、1本の手先経路が1手順に対応しており、被覆の手順を表現できている。それに対して目標線は、1本の目標線が1手順に対応しており、被覆の手順を表現できている。

それぞれの記述方法の問題に対処するために、例えば、物体への重ね方を表すために折り線の曲げ角を付け加える、どの点群や折り線群が1手順であるかを表すためにグループ番号を割り振る、といった改良を行えば被覆に用いることができるかもしれない。しかし、それらは、どのような完成形になるか、手順を踏むかは直感的に理解しにくく、必要な情報が自然な形で記載されていない。

このような考察から、被覆に必要な布と物体の関係性と被覆の手順という情報を自然に表現しているのは目標線であり、被覆作業の記述方法として有効であると考えられる。

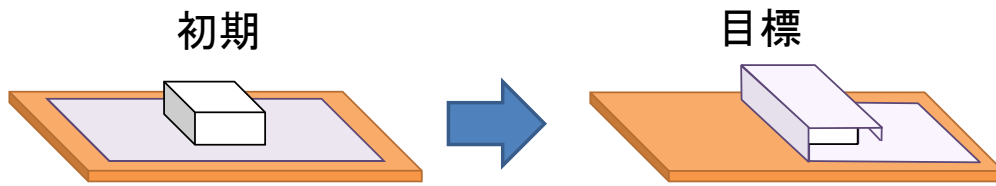


Fig. 1.7: 柔軟物の記述方法の記述例

Table 1.1: 柔軟物の記述方法の比較表

	点	折り線	手先経路	目標線
記述例				
使用例	机上での布の平面展開 [27, 28]	布の折畳み, 箱包み [29, 30, 37]	着衣支援 [38, 39]	CG内での被覆 [40,41]
関係性	○ (ただし、向きは不明)	×	×	○
被覆の手順	×	×	○	○

1.3 研究目的

本研究の目的は、被覆操作をモデル化し、ロボットにこの包む操作をさせることである。第 1.1,1.2 節をまとめると、柔軟物操作には以下のような課題がある。

- a) 柔軟物の形状・変形状態を認識すること
- b) 変形してしまう柔軟物の操作の仕方を計画すること
- c) 物体と接触がある柔軟物操作で、物体と柔軟物の関係を的確に表現・指示すること

第 1.2 節で述べたように、a) について、近年、3次元計測センサや、計算機の向上から、困難であった布などの柔軟物の認識が活発化している。また、b) について、a) の流れに合わせて柔軟物のみの操作（布の折り畳みなど）の研究も活発化している。第 1.1 節で述べたように、c) については、課題 a),b) の次のステップの問題であり、物体に布を巻く、包むといった物体との接触がある操作の自動化のために望まれてくると考えている。これは、物体と布の関係をどう表現するか、動かすか、といった問題が含まれている。本論文では、この c) の課題について取り扱う。物体が関係する柔軟物操作の場合、物体が動かないように押さえておく、布が外れ落ちないように固定する、布を結ぶといった操作なども関わってくるが、本研究はその中でも、布を物体に被覆するという操作に注力する。

この被覆操作の表現の課題に関して、人間の被覆操作を考えた場合、人が人に包み方を指示する時は、Fig. 1.8 のように、大まかな手の動きで示すことが多い(本研究では、この手の動きを「大まかな指示」と呼ぶ)。この大まかな指示は、曲面物体へも被覆の指示を行うことができ、また、手の軌道を示すのみとシンプルで、指示の煩雑さが少ない。よって、本研究は大まかな指示を被覆操作の表現・指示に用いる方針を取る。一方、被覆操作の記述としては 1.2.2 で述べた利点から、目標線が適しているといえる。これらの関係について考えてみると、シンプルな手の動きで作業の要点を伝える大まかな指示は、目標線による記述に比較的容易に落とし込むことができると期待できる。そこで、本研究は人間の「大まかな指示」と実際のロボット動作をつなぐための中間的記述の基礎として、被覆作業の記述を目標線に基づいて行う。

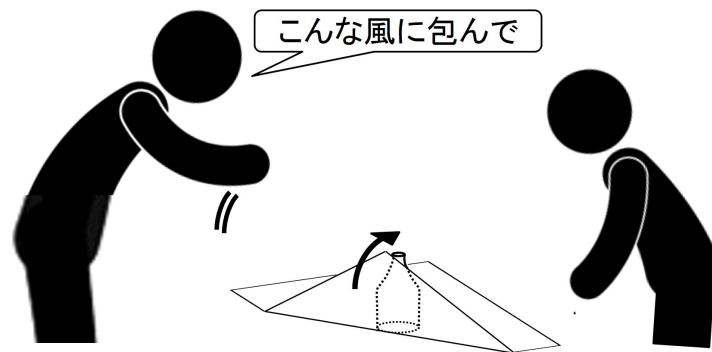


Fig. 1.8: 大まかな指示を用いた包み方の指示

しかし、実世界のロボットに被覆操作を行わせるためには、目標線による記述だけでは十分とはいえない。なぜなら、記述どおりに包むためには、布を操作する手先経路を目標線から計画しなければならない上に、ロボットごとの外形の違いや物体との干渉を考慮し、適宜、布の把持点を変えたり、左右の腕で布を持ち替えなければならないからである。すなわち、目標線の記述からロボット自身の特性を考慮して動作計画を行った上で、操作を実行する必要がある。このように、目標線だけの中間表現だけではロボットを動作させることはできず、さらにロボットごとの動作を表すステップも必要であると言える。

以上を踏まえて、本研究ではロボットによる被覆作業の実現に向けて課題に取り組む。具体的には以下の問題の解決を図る。

- 大まかな指示に基づく被覆作業の枠組みを提案する。中間表現として被覆操作の目標線による記述方法、及び三層構造を用いたモデル化を提案し、実空間のロボットでも利用可能な包み方の表現方法を提案する。
- 被覆作業の直感的な指示方法について検討する。本論文では、人間の「大まかな包む指示」と被覆の関係を考え、その人間の意図する被覆操作を目標線として表す方法を提案する。
- 適切なロボットのための手先軌道を検討する。実際のロボットには可動域や物体との干渉の問題があるため、右手から左手への布の持ち替えなどが必要となる。

これらの方法を用いて実際のロボットが被覆操作を行う時、本研究は産業用ロボットだけで

なく、サービスロボットでも使用できることを目指す。このような工場外の環境では Fig. 1.9 に示すような、様々な作業で汎用的な双腕ロボットが普及することが期待される。近年の生産現場でも、複雑な作業に対応するため、Fig. 1.10 に示すような、短腕アームロボットだけでなく、双腕アームロボットが普及してきている [42]。そのため、本研究も汎用性を備えた双腕ロボットを主眼として、ロボットの動作を考えていく。

これらにより、人間でないと効率的に行えなかった柔軟物を扱った作業の自動化ができるようになると考える。



Fig. 1.9: サービス分野で用いられる双腕ロボット

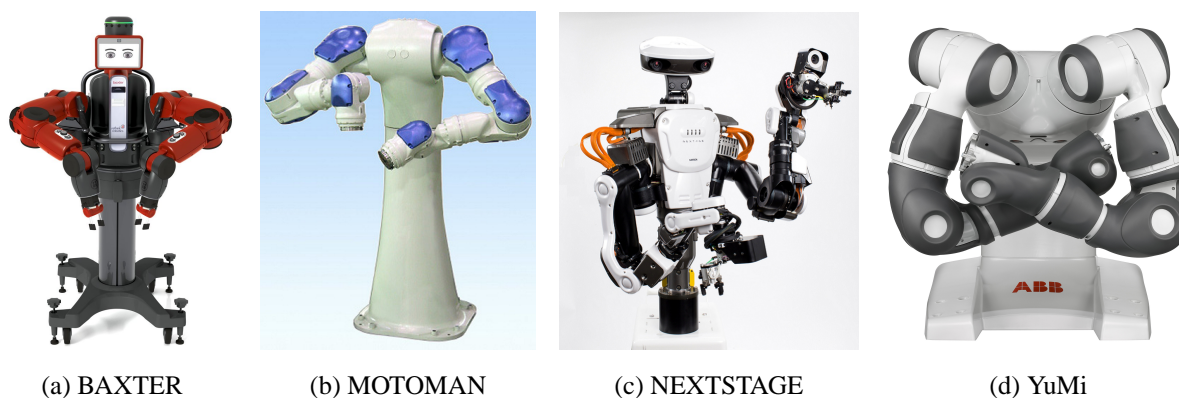


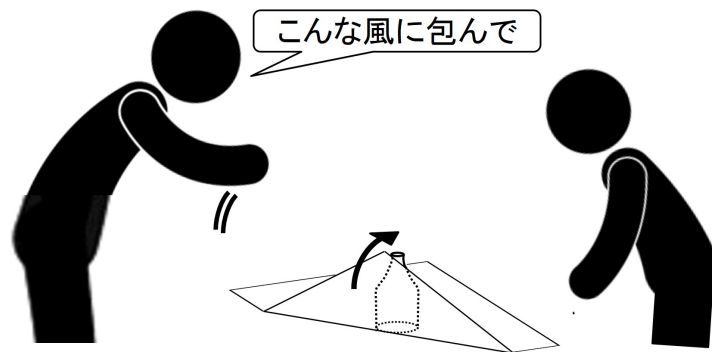
Fig. 1.10: 産業分野で用いられる双腕ロボット

1.4 本論の章構成

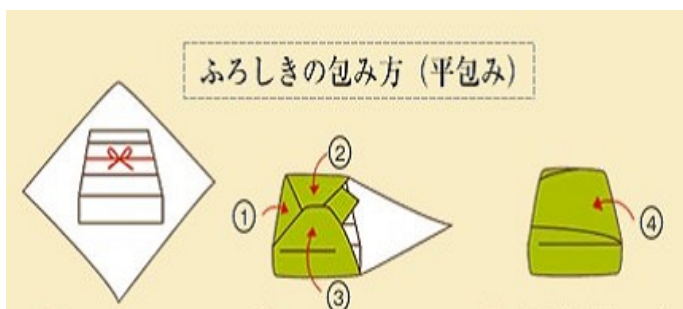
本論文の構成としては，第2章では本論文が提案する被覆作業モデルの概要，そして，目標線と局所凸の定義について述べる．第3章では大まかな指示から目標線によって被覆作業を記述する方法について述べる．第4章では目標線から手先経路し，ロボットの動作を生成する方法について述べる．最後に第5章で本研究の結論を述べる．

第2章 被覆作業の記述方法

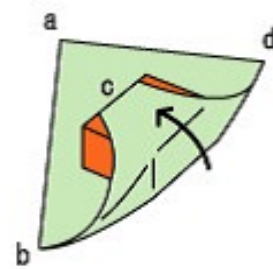
本章では，被覆作業の記述方法について述べる．一般的に，人間に被覆の作業内容を伝える時，手先の動きとも，布の動きとも読み取れる大まかな矢印を手の動き（Fig. 2.1(a)）や絵（Fig. 2.1(b,c,d)）で表現し，指示を行う．人間はこの矢印の意味を，手先の動きとも，布の動きどちらととっても，あるいはどちらの動きとも意識せずに，根本的な作業内容を理解できる．それは，人間が被覆の本質的な布と物体のどうしをどう重ねるのかという意味を，この矢印から無意識に読み取っているためではないかと考える．この意味合いを理論的に表すことができれば，作業教示者が，人間だけでなく，ロボットにも手間をかけずに直感的に被覆作業の内容を伝えられるのではないかと考える．そこで，本章ではこの被覆の本質的な意味合いを表現し，人間だけでなくロボットにも理解できるような記述方法を提案する．



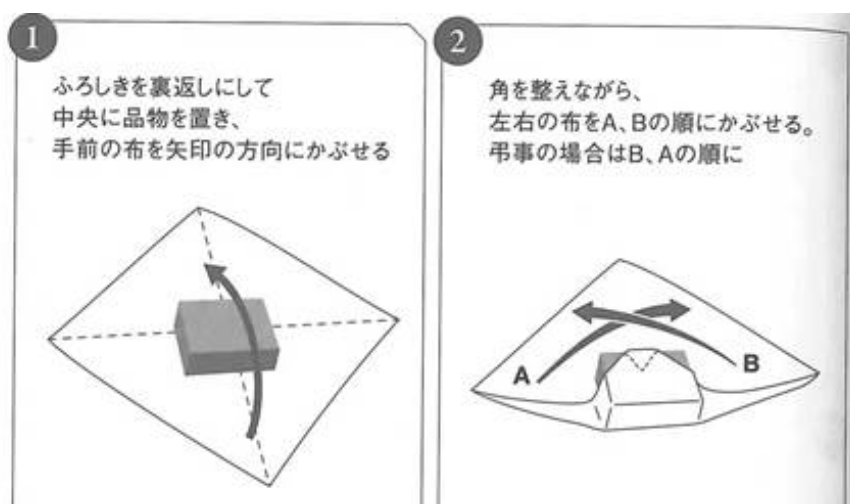
(a) ジェスチャー



(b) 絵を用いた例 1 [43]



(c) 絵を用いた例 2 [44]



(d) 絵を用いた例 3 [45]

Fig. 2.1: 包み方の教示方法

2.1 被覆作業の三階層モデル

本研究の目的は、被覆作業の意図が含まれた直感的な大まかな指示から、実際のロボットの動作を生成することである。そのために、被覆作業を3つの階層に分けて考える。ロボットによる被覆作業というものが、どのような構造で成り立ち、何が必要かと考えた場合、まず必要となるのは、最終的に物体が布で包まれた状態を表現することである。そのためには、この物体と布の静的な関係を的確に表すモデルが必要となる。本研究では、目標線を用いてこの関係を表現する。次に必要となるのは、完成形を実現するための布の把持点とその動かし方を表現することである。そのためには、物体と布の動的な関係を的確に表すモデルが必要となる。最後に必要となるのは、布を適切に操作するための、ロボットの動作軌道を表現することである。そのためには、物体との衝突を避けたり、適切なタイミングで布を持ち替えたりといった、ロボットの動作を表すモデルが必要となる。

以上の議論をまとめると、Fig. 2.2に示すように、以下の3つの階層を用いて、ロボットによる被覆作業のモデル化を提案する。各階層の詳細は後述する。

- インストラクションレベル：物体上と布上それぞれに対応するよう引かれた目標線を用いて、物体を包むための布の重ね方を表す階層。
- ハンドリングレベル：把持点と、把持点の経路（手先経路）を用いて、布を物体に重ねるための布の動かし方を表す階層。
- ロボットレベル：個々のロボットに応じた記述（ロボット動作）を用いて、ロボットの動作計画を表す階層。

本研究の被覆作業の階層モデルにおいて、インストラクションレベルは最も重要な表現である。なぜなら、インストラクションレベルが、被覆作業の最も本質的な情報を持っているからである。まず、ハンドリングレベルはインストラクションレベルで表現されている関係性を満たせば、どんな手先経路でも本質的に問題ない。また、ロボットレベルはインストラクションレベルの関係性を崩さない限りでは、個々のロボットにとって最も都合のよい動作をするのが望ましい。これらの点から、本研究では基本的にはインストラクションレベル

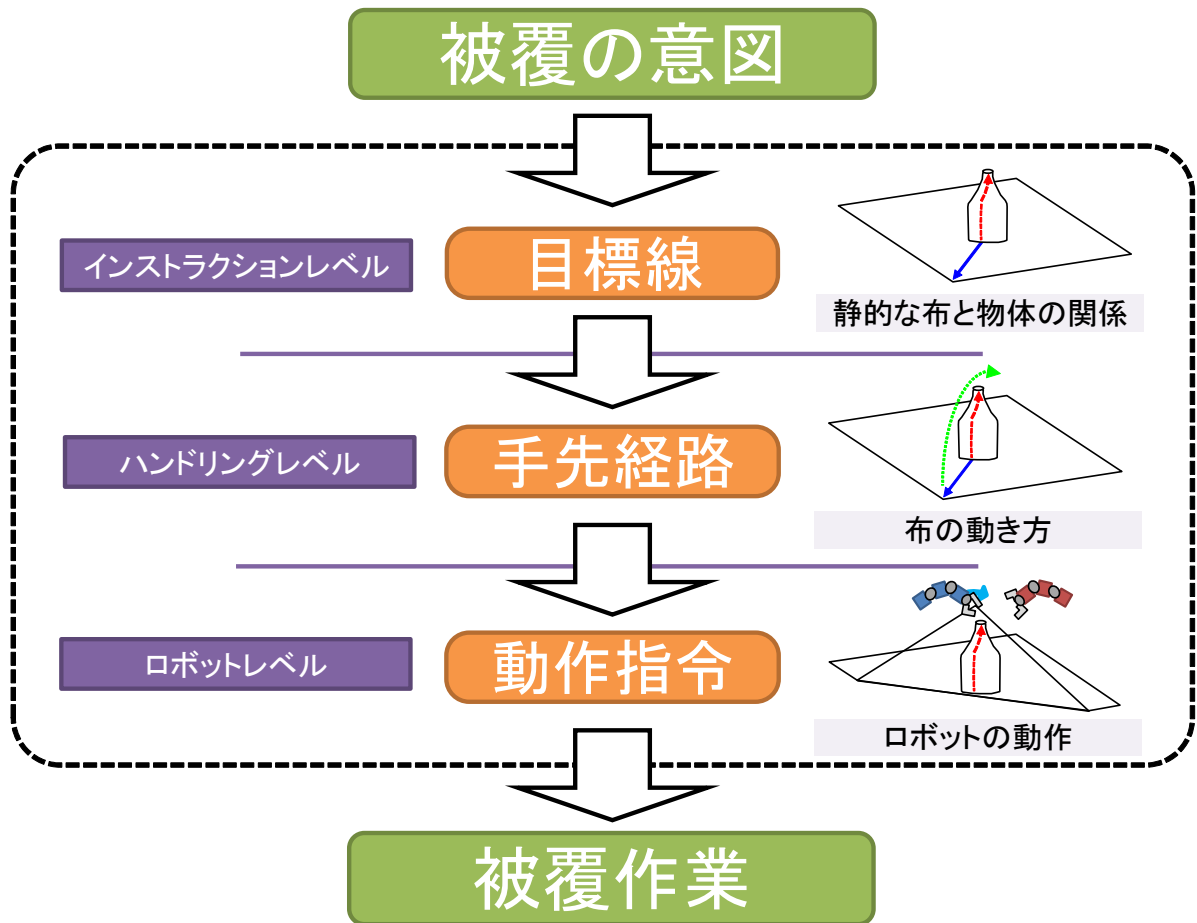


Fig. 2.2: 被覆作業の中間表現

によって、被覆作業を指示する方針を取ることとする。この方針に基づき、ハンドリングレベル、ロボットレベルについてはインストラクションレベルの記述から、自動的に適切な記述を生成する。

2.1.1 インストラクションレベル

インストラクションレベルでは物体と布の重ね方が目標線を用いて表されている。本研究では、人間のたまかな指示に含まれている意図を理解し、インストラクションレベルの記述を生成する手法を提案する。たまかな指示を理解する上で、物体の凹凸について、作業に用いる布のサイズによって凹面を埋めるべきかの判断が必要である。そこで、凹面を含むような複雑な形状の物体に対しても適切な被覆が実現されるように、本論文が提案する形状の局所的な凸性（局所凸）という概念を導入する。これにより、布が覆いかぶさるべき物体表面の領域（以降、被覆領域と呼ぶ）を適切に認識し、目標線を生成することができる。

2.1.2 ハンドリングレベル

ハンドリングレベルでは布の動かし方が手先経路を用いて表されている。本研究では、布の把持点と目標線から、ハンドリングレベルの記述が生成される。このとき、布が弛まないように物体に巻きつけられる必要がある。そこで、提案手法では、布が弛まないように布を張りながら巻きつける経路を生成する。これにより、布の把持点に合わせて最適な手先経路を生成することができる。

2.1.3 ロボットレベル

ロボットレベルではロボットの実際の動きが表されている。ハンドリングレベルで生成された手先経路がロボットに与えられた時、実際は、最初の把持状態から経路の最後まで到達することは不可能な場合もある。そのため、双腕アームを用い、経路の途中で片方の手に布を渡したり（持ち替え）、布を掴み直したりして（持ち直し）、手先経路を進んでいく必要がある。そこで、提案手法では、そのような持ち替え・持ち直し動作も組合せて、手先経路どおりに布を巻くために最適なロボット動作の探索を行う。これにより、手先経路から最適なロボット動作を計画し、ロボットの被覆動作を生成することができる。

2.2 目標線

本節では、被覆モデルの中心となるインストラクションレベルで用いられる目標線という記述方法について述べる。Fig. 2.3(a)に示すように、目標線は物体上と布上にそれぞれ対応するように引かれている。そして、Fig. 2.3(b)に示すように、被覆時の布と物体の関係は、この目標線のペアが重なった状態として表される。この目標線を用いた記述方法は、様々な物体形状への被覆作業の記述に有用である。なぜなら、他の記述と比べ、平面だけでなく曲面形状への指示も行いやすく、また、どのような流れで、物体のどこを包むかという被覆の本質的な情報を、自然に表すことができるためである。

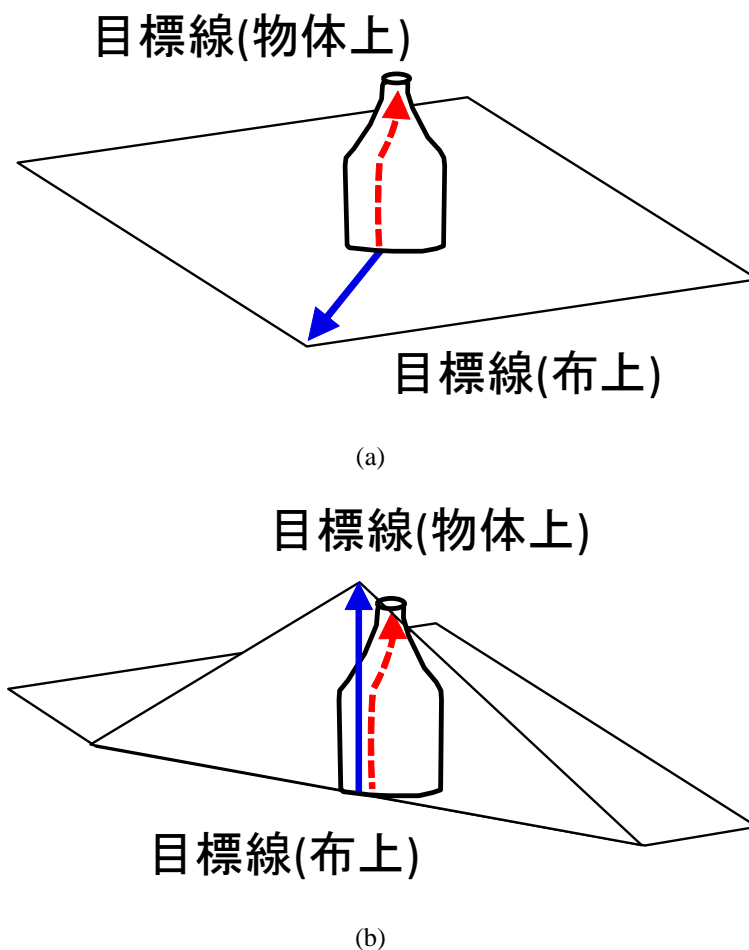


Fig. 2.3: (a) 物体と布上に引かれた目標線 (b) 目標線どうしを重ねることによる被覆表現

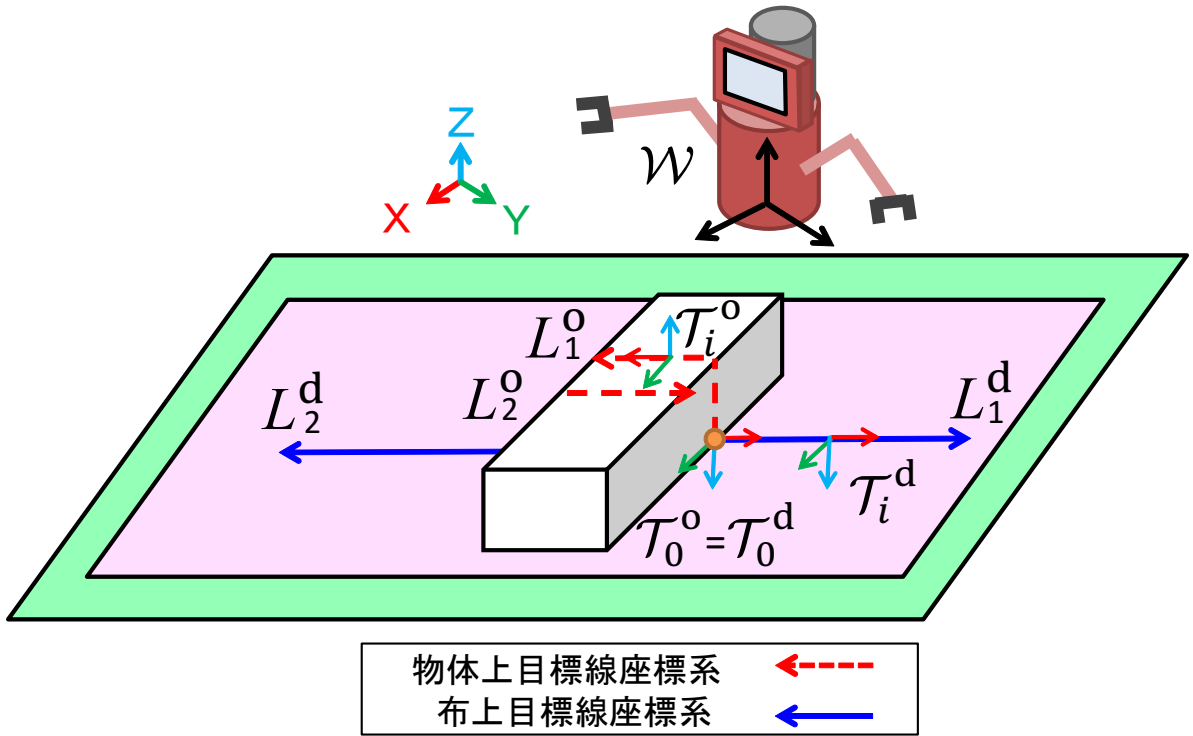


Fig. 2.4: 物体と布上の目標線の関係

以下に、目標線の具体的な定義を説明する．本論文では、 \mathcal{A}_1 、 \mathcal{A}_2 の2つの座標系が与えられたとき、 \mathcal{A}_1 から \mathcal{A}_2 への同時変換行列を式 (2.1) のように表記する．

$${}_{\mathcal{A}_2}T_{\mathcal{A}_1} = \begin{pmatrix} {}_{\mathcal{A}_2}R_{\mathcal{A}_1} & {}_{\mathcal{A}_2}t_{\mathcal{A}_1} \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{pmatrix}, \text{ where } \mathbf{0}_3 = (0, 0, 0) \quad (2.1)$$

ベクトル v の座標系 \mathcal{A} 上での表現を ${}^{\mathcal{A}}v$ と表記する．Fig. 2.4 に示すように、ワールド座標系を \mathcal{W} とし、対応する物体上・布上の目標線は L_j^o, L_j^d と表す (j は目標線のインデックス)．各目標線には目標線座標系 \mathcal{T}_i が張られており、物体上目標線座標系の位置成分を t^o 、布上目標線座標系の位置成分を t^d とする時、物体上目標線 ${}^{\mathcal{W}}t_{\mathcal{T}^o}$ 間の間隔と布上の目標線 ${}^{\mathcal{W}}t_{\mathcal{T}^d}$ 間の間隔は対応するようになっている) 式 (2.2) ．

$$\|{}^{\mathcal{W}}t_{\mathcal{T}_i^o} - {}^{\mathcal{W}}t_{\mathcal{T}_{i-1}^o}\| = \|{}^{\mathcal{W}}t_{\mathcal{T}_i^d} - {}^{\mathcal{W}}t_{\mathcal{T}_{i-1}^d}\| \quad (2.2)$$

被覆操作を行うときには、この物体上の目標線座標系 \mathcal{T}_i^o と布上の目標線座標系 \mathcal{T}_i^d が重なるように操作する．各目標線座標系の x 軸方向は目標線の進行方向を示す．物体上の目標

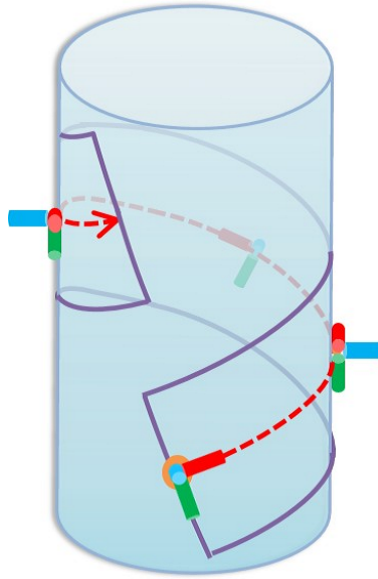


Fig. 2.5: 円柱に斜めに布を巻く場合

線座標系の z 軸方向は表面の法線を表し，布上の目標線座標系の z 軸方向は物体と触れない側の面の法線を表す．この目標線座標系 T の張られた目標線 L のペアを用いて，被覆する方向と，目標の被覆状態を表す．目標線を用いれば，Fig. 2.5 に示すような，円柱へ布を斜めに巻く操作も記述することができる．本論文が提案する三階層モデルのインストラクションモデルでは，この目標線を用いて，被覆時の物体と布の静的な関係を記述する．

2.3 凹物体上での目標線

本節では，被覆する物体形状の中で，特に重要な項目である凹物体上に目標線を記述する場合について述べる．一般的に物体を布で包むとき，Fig. 2.6に示すように，左側の物体のようにではなく右側のように，物体の凹部分は塞いで布をピンと張るのが通常の包み方である．重力やハンドの引っ張る力を用いて凹面部分に布を入れ込むような被覆も挙げられるが，本研究では布の幅より小さい凹面は避けて布で物体を覆うという代表的な被覆を対象とする．

そのため，Fig. 2.7(a)に示すように，凹面を持つ形状に布を被覆する場合は，物体に凸包化処理を行い，凹部分を避けた面に被覆領域を生成する必要がある．一般的な凸包化処理とは，ある形状の物体や物体群について形状の凹部を埋め凸包を生成するものであり [46–62]，通常行われる物体形状全体の凸包化は *global convex hull* と呼ばれる．また，関連して，物体形状の凹凸を数値化する *convexity measurement* [63–65]，凹凸から物体を大まかなセグメントに分割する *convex decomposition* [66–68] の研究も挙げられる．ここで，Fig. 2.7(b)に示すような，凹面を持つ3次元物体に布を被覆する場合でも，物体に凸包化処理を行えば凹部分を避けた被覆領域を生成できると思われる．

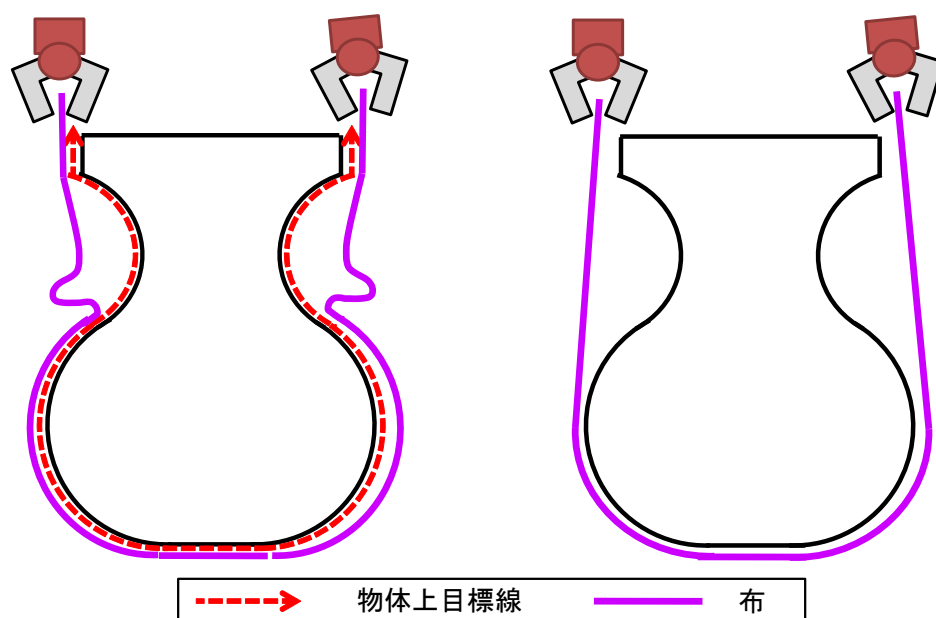


Fig. 2.6: 凹部分への被覆

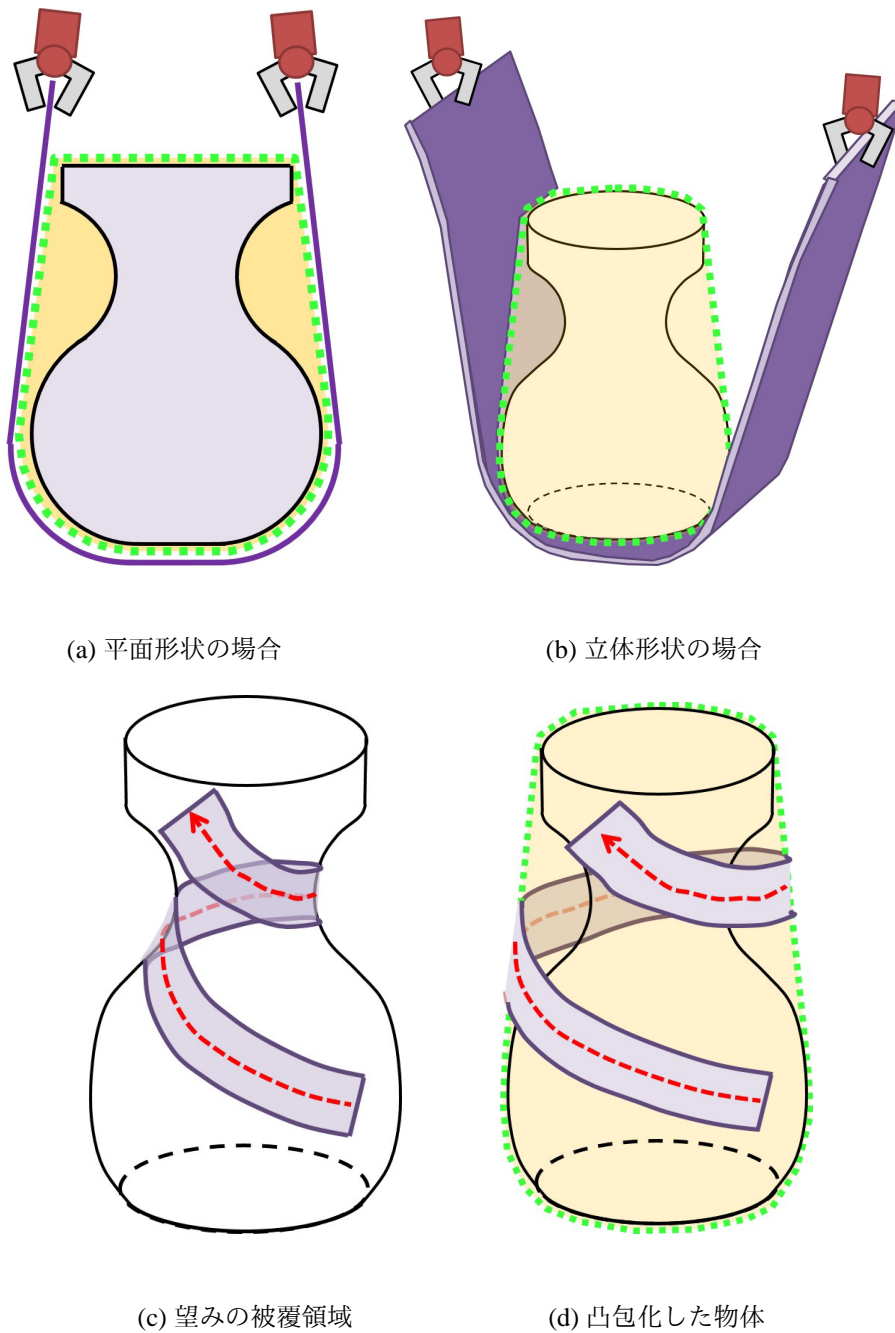


Fig. 2.7: Global convex hull

しかし、Fig. 2.7(c) に示すような巻き付けを含む被覆を望む場合に、Fig.2.7(b) に行った global convex hull 処理を用い凹領域を埋めた場合、Fig. 2.7(d) に示すような被覆領域を生成してしまう。この被覆領域を用いた場合、布を何も無い領域に巻きつけようとするため布が弛んでしまい、目標通りの巻付けを行うことができない。このように、一般的な global convex

hull 処理では、布の幅を考慮した被覆に最適な凸面領域を適切に生成することはできない。また、関連する物体形状全体の凹凸の数値化や、大まかな形状分割手法に関しても、global convex hull のように物体全体を基に凹凸を扱っていくので、被覆に適した凸化処理を行うことはできない。

そこで、被覆に適した凹面の処理方法を提案する。被覆に理想的な領域は、Fig. 2.7 のように入力された領域全体で凸包の性質を持つということではなく、Fig. 2.8 に示すように、領域中の至る所で局所的な凸包の性質を持てばいいと言える。本研究では、この局所凸という概念を提案する。布が重なる被覆領域を、Fig. 2.9(a) に示すように、この布の幅の線分（以

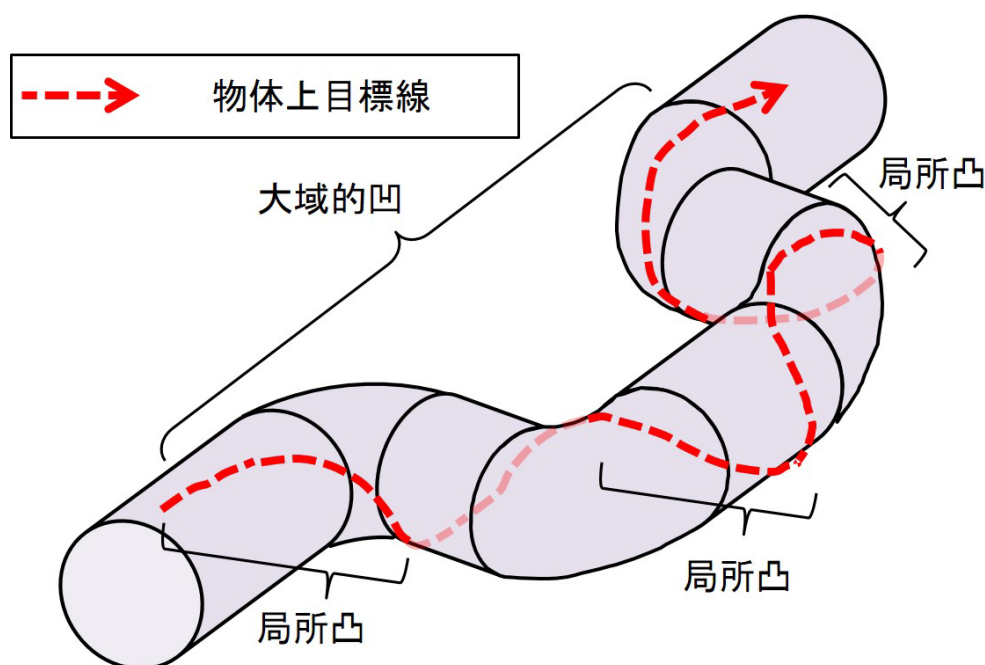
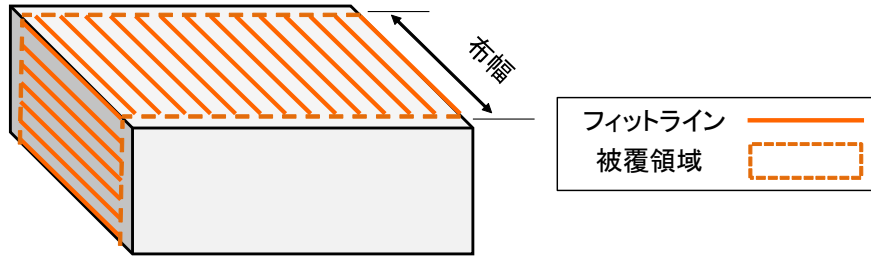
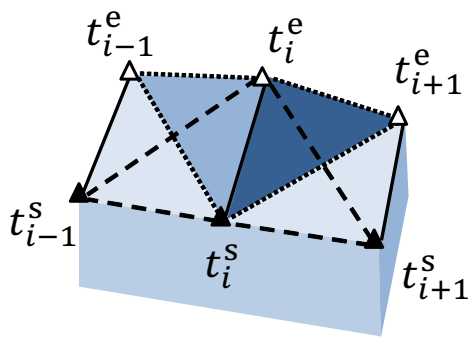


Fig. 2.8: 大域的な凹と局所的な凸

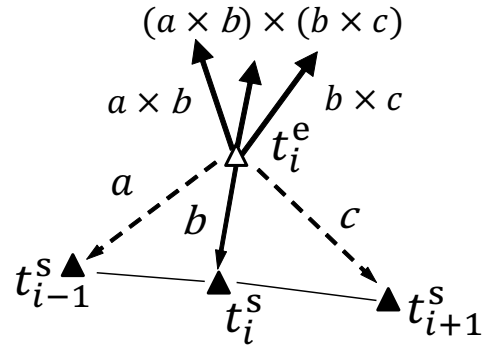
降、フィットラインと呼ぶ)で微小な一定区間ごとに離散化し、このフィットライン群で表される被覆領域について考える。ここで、フィットラインは $i=0, \dots, N$ のインデックスをもつものとし、 i 番目のフィットラインの始点、終点を t_i^s, t_i^e とする。Fig. 2.9(b) に示すように、 i 番目のフィットライン ($i=0, N$ を除く) と、その前後のフィットラインからなる領域について、まず、 $\triangle(t_i^s, t_i^e, t_{i-1}^s)$ と $\triangle(t_i^s, t_i^e, t_{i+1}^s)$ の2つの三角形の垂線どうしが成す成分 $\cos \theta_i^s$ を式(2.3)から求める (Fig. 2.9(c))。



(a) フィットライン群で表される被覆領域



(b) 局所領域



(c) θ_i^s の角度計算方法

Fig. 2.9: 局所凸の定義

$$\cos \theta^s = \left\{ \frac{(a \times b) \times (b \times c)}{\|(a \times b) \times (b \times c)\|} \right\} \cdot b \quad (2.3)$$

ただし, $a = t_{i-1}^s - t_i^e$, $b = t_i^s - t_i^e$, $c = t_{i+1}^s - t_i^e$

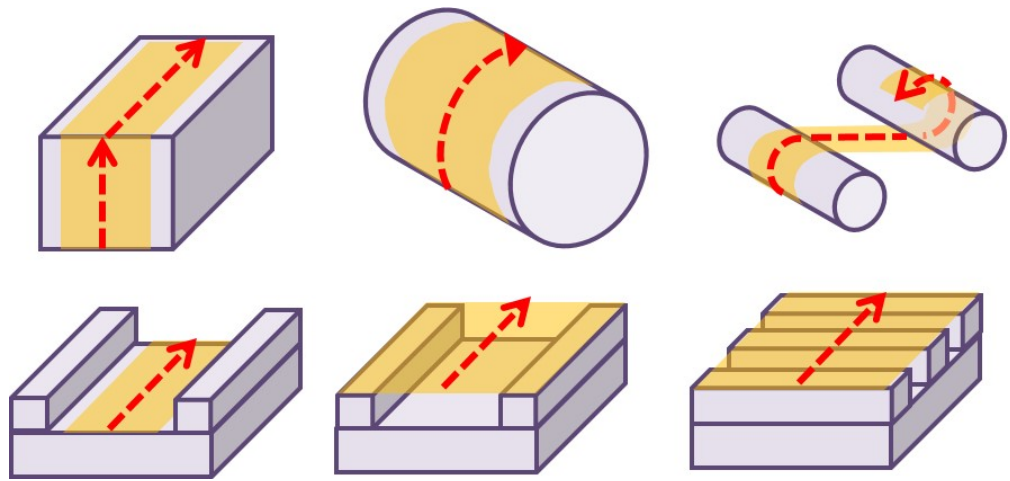
次に, $\Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i+1}^e)$ と $\Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i-1}^e)$ の2つの三角形の垂線どうしが成す成分 $\cos \theta_i^e$ についても, 同様に求める. もし, これらが $\cos \theta_i^s \leq 0$ かつ $\cos \theta_i^e \leq 0$ を満たすなら, i 番目のフィットラインとその前後のフィットラインから構成される局所領域は凸面であるとする. このように, 局所凸とは, あるフィットラインとその前後のフィットラインから構成される局所領域が凸面であることと定義する. そして, 被覆領域中の至る所で局所的な凸包の性質を持つ場合, 被覆領域が凸であると呼ぶこととする. 本研究では, 凹物体を被覆の対象とする場合は, 目標線を引く過程で局所凸となるように凸化処理を行う. 具体的なアルゴリズムについては次章以降で詳述する.

2.4 目標線指示の適応範囲

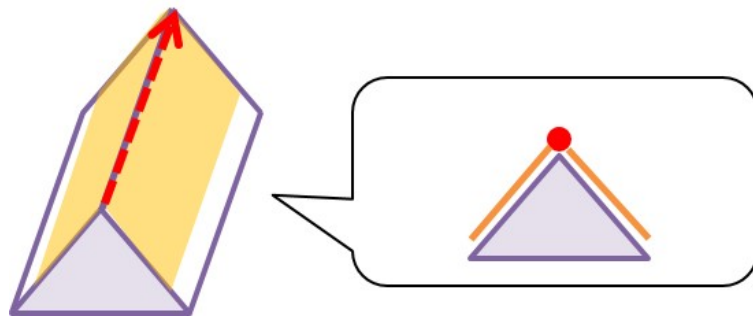
目標線を用いた記述方法で指示できる形状について、具体例を挙げながら述べる。まず、Fig. 2.10(a)に示すように、平面だけでなく、曲面形状、凹凸形状に目標線による指示が行える。次に、Fig. 2.10(b)に示すような、角上のエッジへの被覆を行いたい時、図のような目標線を記入し、その記述どおりに布を重ねれば達成することができる。ただし、エッジ上への目標線入力の後述する提案教示方法では困難なため、その点に関しては今後、教示方法に改良が必要となる。最後に、Fig. 2.10(c)に示すような、球面や円錐面については、目標線による指示は可能であるが、フィットラインが物体表面から離れる部分があったり、フィットラインどうしが平行でなかったりする場合があるため、被覆作業を実行すると皺や弛みが発生する。しかし、例に示したような方法で物体を包もうとする時、そもそも、このような皺や弛みは不可避である。人がこのような被覆を行うときは、適宜、皺を整えるなどの操作を行い仕上がりを整えるが、本手法では、皺の形状の制御には対応していない。

2.5 まとめ

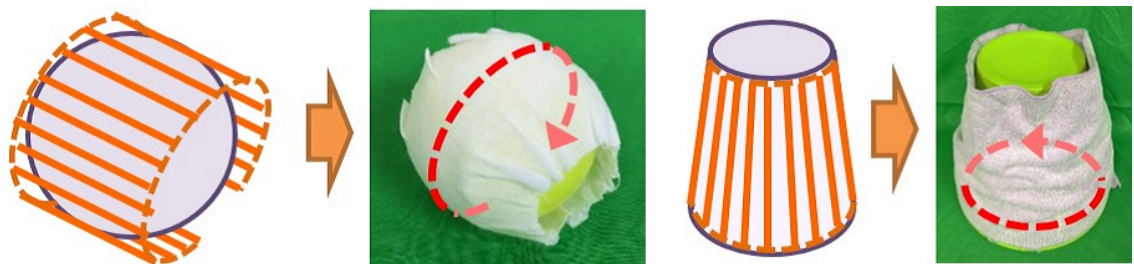
本章では、ロボットによる被覆作業について、目標線を中心とした記述モデルを提案した。そして、ユーザーがロボットに直感的な目標線指示を行うための、人間の大まかな指示について述べた。また、その大まかな指示から被覆作業を行うためのロボットの動きまでを、三階層のモデルを用いて表現することを提案した。ここでは、目標線という記述方法と、大まかな指示に含まれる被覆作業の意図を表す方法を述べた。その中では、凹部分の被覆領域の問題について述べ、局所凸という概念を提案した。



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.10: 目標線による記述の適用範囲

第3章 目標線による大まかな指示の記述 (インストラクションレベル)

本章では、大まかな指示によって直感的に目標線を記述する方法について述べる。大まかな指示の何に注目すれば、被覆の意図を理解できるかと考えた時、本研究は、その指示を行う手の正確な3次元的な軌跡ではなく、手の軌跡とその軌跡が通過していく物体表面の關係に注目する。この關係をデータとして取得し、それに含まれる意図を目標線によって記述する方法について、詳細を述べていく。

3.1 教示方法

実際にユーザーが大まかな指示を用いて被覆作業の教示をするために、本研究は教示デバイスを用いた方法を提案する。Fig. 3.1 に提案教示方法の概要を示す。ユーザーは教示デバイスを持ち、望みの被覆領域に向けて動かしていくことにより、システムが指示を理解する。この教示デバイスにはデプスセンサと磁気式のモーションセンサが取り付けられており、深度情報と教示デバイスの動きを取得することができる。このデータから物体上の被覆領域を計測し、これを処理することによりユーザーの意図を理解し、目標線を生成する。

モーションセンサより求まるデプスセンサの座標系を \mathcal{K} とし、デプスセンサは被覆に用いる布の幅 d 分の線分をスキャンする（以降、得られた点群データをスキャンラインと呼ぶ）。物体表面の向きを表すラインの始点 t^s 、終点 t^e として、得られたスキャンラインを構成する点の集合 S の端点を求め、この t^s 、 t^e の中点を t^o とする。本論文では、この t^s 、 t^e で表される線分をフィットラインと呼ぶこととする。

このフィットラインとデプスセンサの座標系 \mathcal{K} から物体上目標線座標系 \mathcal{T}^o を求める方法

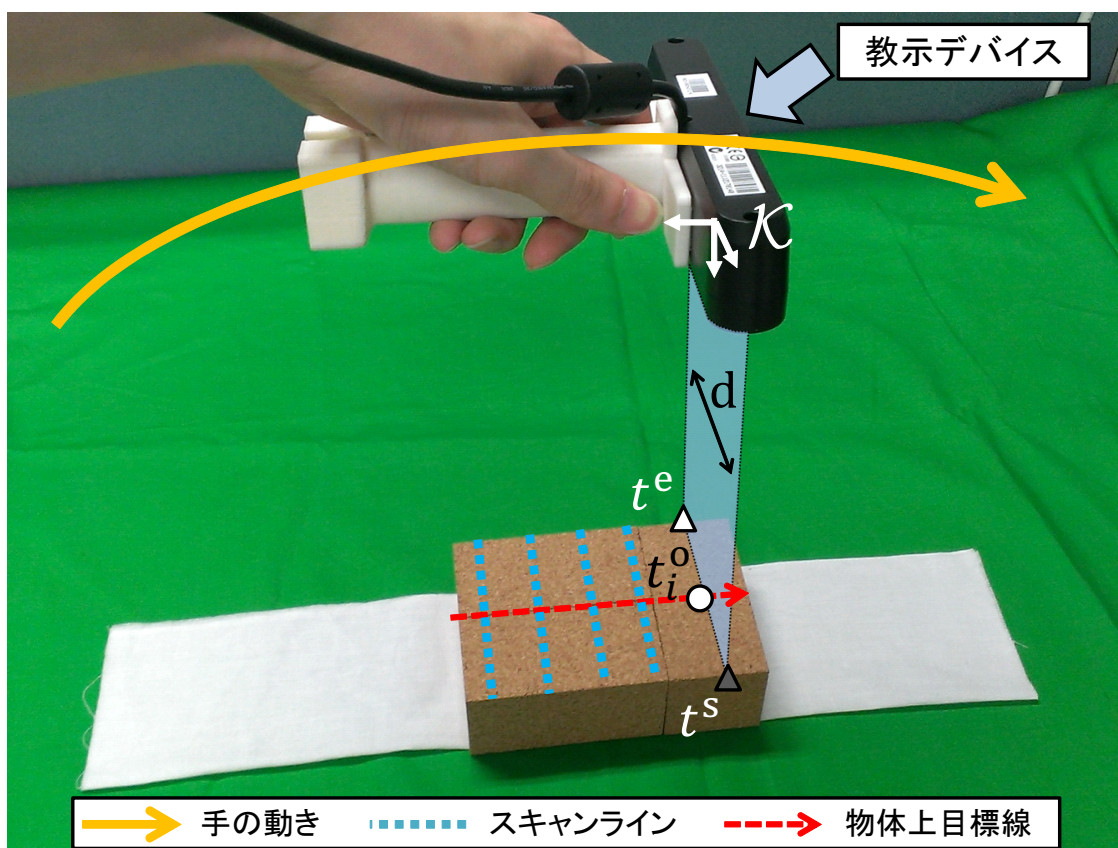


Fig. 3.1: 物体上目標線の教示

について述べる. Fig. 3.2 中央部に示す教示デバイスのデプスセンサ座標系 \mathcal{K}_i から見た物体上目標線座標系 \mathcal{T}_i^o の姿勢 ${}^{\mathcal{K}_i}R_{\mathcal{T}_i^o}$ について, 初めに式 (3.1) を用いて, フィットラインの単位ベクトル f を Fig. 3.2 左上部に示すように計算する.

$$f = \frac{t_i^e - t_i^s}{\|t_i^e - t_i^s\|} \quad (3.1)$$

次に \mathcal{T}^o について各軸の成分は次式で定める (Fig. 3.2 参照).

$$m_x = \frac{t_i^o - t_{i-1}^o}{\|t_i^o - t_{i-1}^o\|}, m_z = m_x \times f, m_y = m_z \times m_x$$

式 (3.2) を用いて, Fig. 3.2 右上部に示すように \mathcal{T}^o の x 軸成分 m_x を求める. この m_x と f から m_z を求め, 最後に m_x と m_z から m_y を求める. このようにして \mathcal{T}^o の軸成分から, \mathcal{T}^o の姿勢 ${}^{\mathcal{K}_i}R_{\mathcal{T}_i^o}$ を求める.

$${}^{\mathcal{K}_i}R_{\mathcal{T}_i^o} = \begin{pmatrix} m_x & m_y & m_z \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

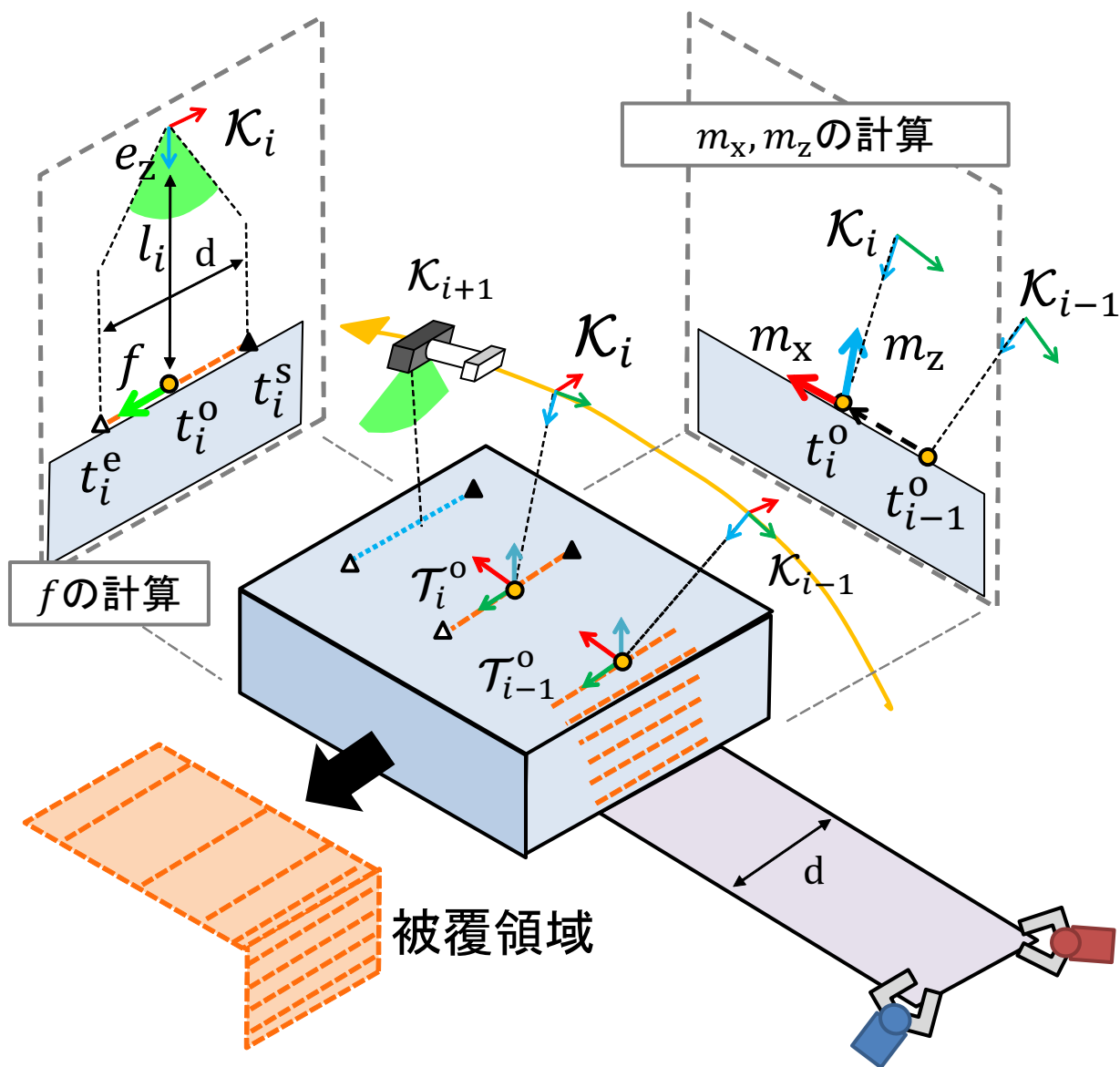


Fig. 3.2: 物体上目標線座標系 T^o の導出

また, Fig. 3.3(a)に示すように, 教示デバイスを動かしている時に, 誤ってデバイスを傾けてしまい, $t_3^o \rightarrow t_4^o$ のように目標線が逆走してしまう場合がある. そこで, 本手法では Fig. 3.3(b)に示すように, 記述済みの領域に再び目標線を引いてしまうのを防ぐ判定処理を用いる. 判定処理では Fig. 3.4に示すように, 新たに入力された目標線 t_i^o が一つ前の t_{i-1}^o の表す領域と重複していないか判定する. 具体的には式 (3.3) に示すように, 記述済みの領域に存在していないかを v_i が閾値 α 以上の長さであるかで判定し, かつ, 急に目標線が曲がるような入力でないかを $|\theta_i|$ が β 以内の角度にあるかで判定する. 例えば, 教示デバイスで t_{i-1}^o まで入力さ

れている時，逆走して式 (3.3) 判定外のデータが入力されている間は目標線の更新が止まり，再び判定内のデータが入力されると t_i^o から目標線が更新されていく。

$$\|\mathbf{v}_i\| > \alpha \text{ かつ } |\theta_i| < \beta \quad (3.3)$$

$$\text{ただし, } \mathbf{v}_i = t_i^o - t_{i-1}^o, \quad \cos \theta_i = \frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{v}_i}{\|\mathbf{n}_i\| \|\mathbf{v}_i\|}, \quad \mathbf{n}_i = {}^w R_{T_{i-1}^o} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

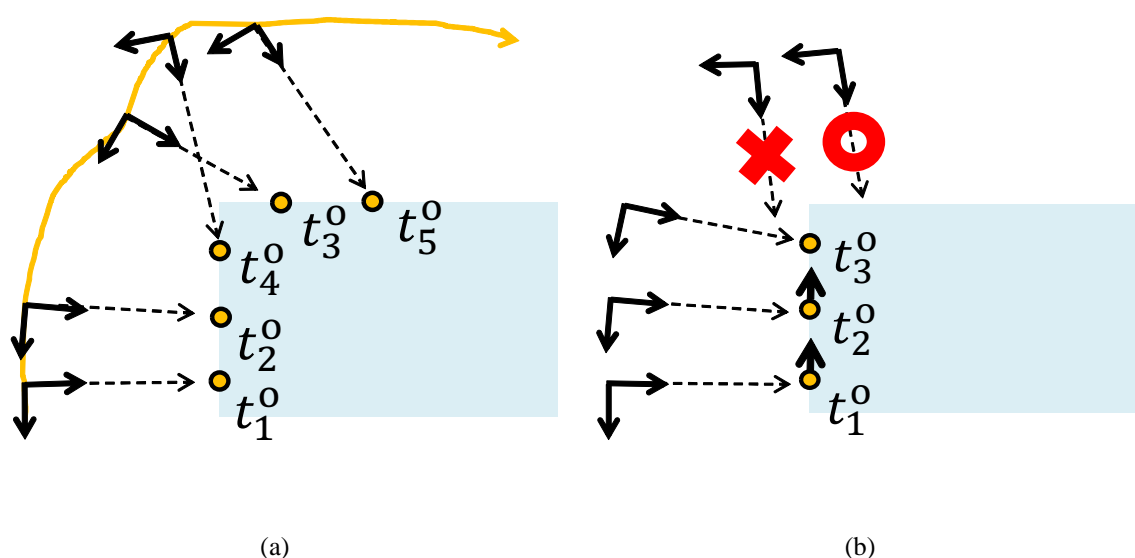


Fig. 3.3: 目標線入力処理 (a) 間違った入力処理 (b) 正しい入力処理

最後に布上目標線の入力方法について述べる。Fig. 3.5 に示すように，1本の線分で表せる目標線を布上に入力する場合，初期布上目標線として，目標線の始点 t^{ds} と終点 t^{de} を教示デバイスで決める。この時，布上目標線の始点は物体上目標線の始点を用いるので， $t^{ds} = t_0^o$ となり，終点 t^{de} の方はデバイスでスキャンラインを1ラインだけ入力し，そこから求まるフィットライン中点の位置を終点とする。システムは布上目標線座標系を，式 (2.2) のように物体上の目標線座標系間の間隔に合わせて，始点 t^{ds} から，始点と終点より表される線分方向に布上の目標線座標系を配置する。座標系の姿勢は式 (3.4) のように，始点終点入力時の

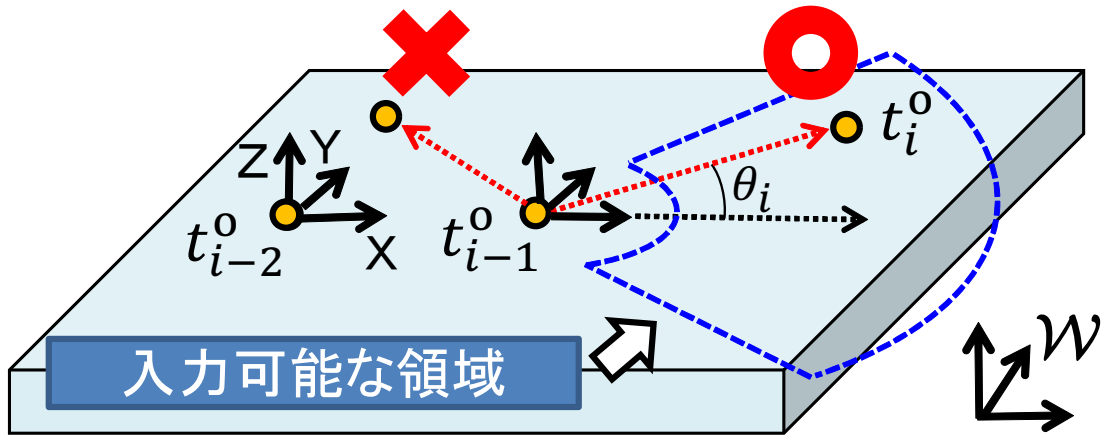


Fig. 3.4: 物体上への目標線指示

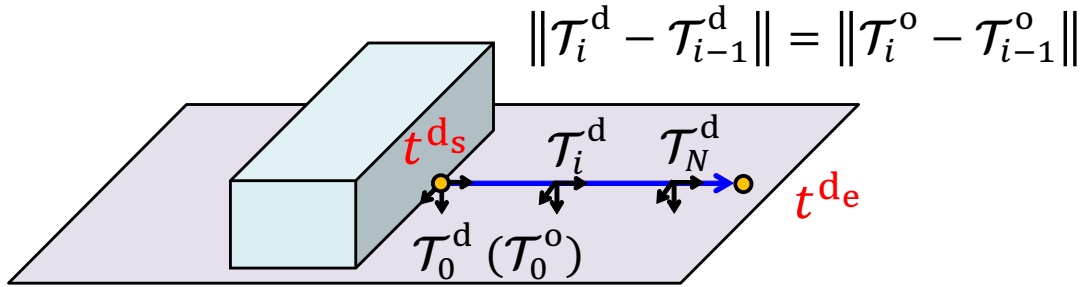


Fig. 3.5: 布上への目標線指示

フィットラインから計算する．これらのフィットラインから求まる布の面（デバイスから反対側の方の面）の垂線 m_z と，初期布上目標線の方法 $t^{de} - t^{ds}$ を用いて座標系の姿勢は定められる．このようにして布上目標線 L_j^d を生成する．

$${}^w R_{\mathcal{T}_i^d} = \begin{pmatrix} m_x & m_y & m_z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$m_x = \frac{t^{de} - t^{ds}}{\|t^{de} - t^{ds}\|}, \quad m_z = f \times m_x, \quad m_y = m_z \times m_x$$

このように，教示デバイスを用いた提案方法により，大まかな指示による被覆作業の指示が可能となり，その内容を目標線として記述することができる．また，教示デバイスで必要な部分の物体形状を取得しながら指示を行うので，事前に CAD モデルのような物体の形状情報を作成しておく手間を省くことができる．

3.2 凹面への目標線指示

3.2.1 凹面への被覆指示

前節では、大まかな指示から目標線を生成する方法について述べた。しかし、実際の物体形状には凹凸があり、被覆を行うときは、その凹凸を考慮する必要がある。第2.3節で述べたように、本研究では布の幅より小さい凹面は避けて布で物体を覆うという代表的な被覆を対象とする。また、ユーザーからは重力方向を考慮した破綻のない指示が送られていることを前提とする。そのため、ハンドが操作を終了して布を放した瞬間、布が剥がれ落ちるようなことはないものとする。これらに基づき、本節ではその被覆に適切な凹凸の処理方法を提案する。

3.2.2 スキャンライン上での凸包処理

本項ではスキャンライン上の凹凸の処理について述べる．初めに，センサ座標系 \mathcal{K} から得た布の幅 d 分のスキャンラインを構成する点の集合 (Fig. 3.6(a)) の凸包多角形を求める (Fig. 3.6(b))．この凸包多角形について，センサ座標系 \mathcal{K} から見て凸包多角形の上包と，センサ座標系の z 軸の延長線の交点を t^0 とする (Fig. 3.6(c))．そして， t^0 を含む上包の線分を t^0 を中心に布の幅 d の長さまで延長し，フィットラインとする (Fig. 3.6(d))．これにより，スキャンライン上での凹部分の凸化ができる．

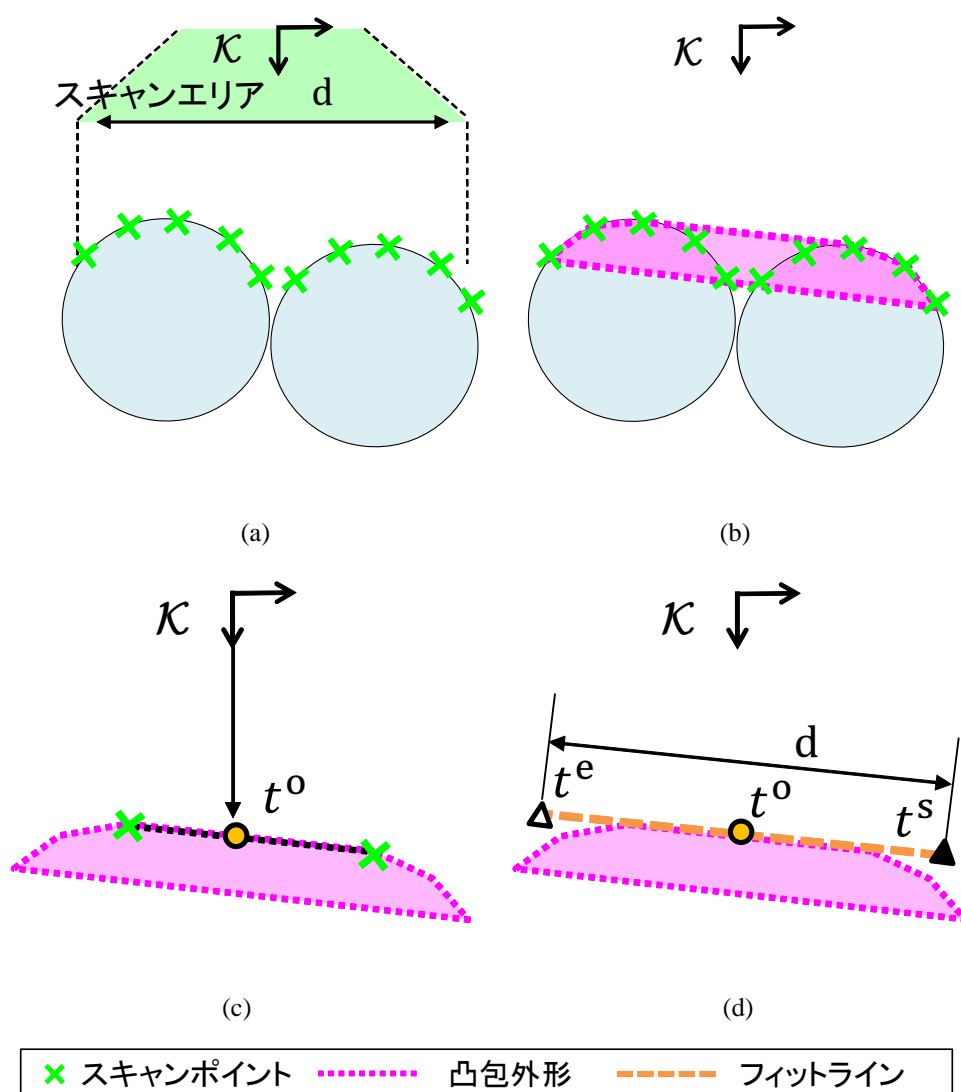


Fig. 3.6: スキャンラインの凸包化

3.2.3 スキャンライン間での凸包処理

本項ではスキャンライン間での凸包化処理を行い被覆領域を凸化する処理について説明する。前項より、入力された各スキャンラインは凸化され、被覆領域はフィットライン群（フィットラインの始点、終点の点群 $F = t_i^s, t_i^e$ ）として表される。本手法は、このフィットライン群について、被覆に適した領域を生成するように第 2.3 節で述べた局所凸化処理を行う。

Fig. 3.7(a) に示すように、あるフィットラインと、その前後のフィットラインからなる領域について、2つの三角形 $\Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i-1}^s)$ と $\Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i+1}^s)$ の垂線が成す角の余弦 $\cos \theta_i^s$ を第 2.3 節の式 (2.3) から求める。このように $\cos \theta_i^s$ を求める処理を、これ以降、以下の式 (3.5) のように書くことにする。

$$\cos \theta_i^s = \text{CalAngle}(\Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i-1}^s), \Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i+1}^s)) \quad (3.5)$$

これらが $\cos \theta_i^s > 0$ または $\cos \theta_i^e > 0$ の場合、2つの三角形で表されている面は凹面であるので、凸包化処理を行う。この時、一般的な凸包化方法では凹面を塞ぐため、 $t_{i-1}^s \sim t_{i+1}^s$ 間を繋ぎ、 t_i^s を消去してしまうが、提案方法では Fig. 3.7(b) に示すようにフィットラインの端点として残すために、 t_{i-1}^s と t_{i+1}^s の中点を補間点 $t_i^{s'}$ として作成する。このようにして被覆領域を表す点群を更新する。この処理内容を $\Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i+1}^e)$ と $\Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i-1}^e)$ の側についても、同様に行う。そして、すべての $\cos \theta_i^s, \cos \theta_i^e$ が正となるように、これらの Convex hull 処理を含む Algorithm 1 に示す処理を行う。この Algorithm 1 は局所的な凸包化処理をフィットラインの

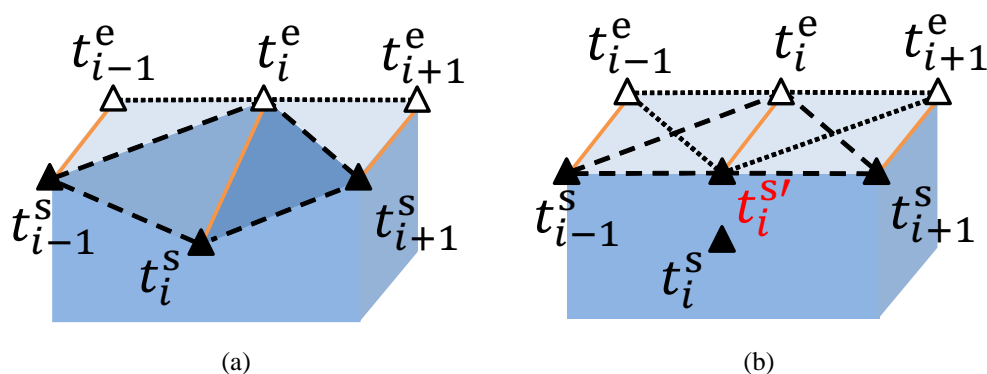


Fig. 3.7: 局所凸包化処理 (a) 初期の凹被覆領域 (b) 凸化された局所領域

シーケンス内で繰り返し行うことにより凹部分を埋めていくことができる。これにより局所凸包の性質を持つ被覆に適した領域を生成することができる。以上のようにして、フィットラインシーケンス上で提案方法の局所凸包化処理を行うことにより、既存の凸包処理では生成できなかった、被覆に適した到る所凸の領域生成、及び目標線の指示が可能となる。

Algorithm 1 Local Convex Hull, (t^s, t^e)

loop

$count = 0$

for all i such that $1 \leq i \leq N - 1$ **do**

$\cos \theta^s = \text{CalAngle}(\Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i-1}^s), \Delta(t_i^s, t_i^e, t_{i+1}^s))$

$\cos \theta^e = \text{CalAngle}(\Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i+1}^e), \Delta(t_i^e, t_i^s, t_{i-1}^e))$

if $\cos \theta^s > 0$ **then**

$t_i^s \leftarrow \frac{1}{2} (t_{i+1}^s - t_{i-1}^s)$

$count ++$

end if

if $\cos \theta^e > 0$ **then**

$t_i^e \leftarrow \frac{1}{2} (t_{i+1}^e - t_{i-1}^e)$

$count ++$

end if

end for

if $count = 0$ **then**

return

end if

end loop

3.3 目標線の補正処理

ここでは、目標線への手振れの影響を補正する方法について述べる。教示デバイスによる目標線入力時、直線を入力したつもりでも手の振れによって、目標線も振れてしまう場合がある。目標線の入力については第3.1節の式(3.3)で定義したように、線が急に逆走したり、大きく離れた所に入力されないものとしている。よって、この教示デバイスに伴う手の振れとは、入力したい目標線の進行方向に対する垂線方向でのずれである。物体へは直線や緩やかな曲線形状の目標線を入力することが多いため、提案方法は、この直線や緩やかな曲線の目標線の入力を可能にするための補正を行う。そこで、必要となる線を滑らかにする方法としては、線を構成する点の位置を補正するスプライン補間等が一般的に挙げられるが、これらの補正をそのまま物体上目標線に行った場合、Fig. 3.8のように角上では物体内にめり込むような形で補正してしまう場合がある。

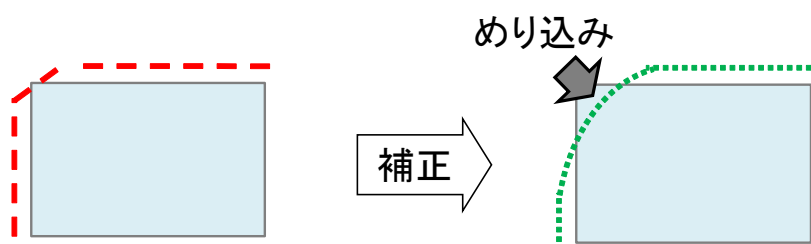


Fig. 3.8: 目標線の物体内へのめり込み

そのため、提案方法では式(3.6)のように目標線が物体表面上にあるのを保つような補正を行う。具体的には、スプライン補間で滑らかにした目標線 (Fig. 3.9(a)) を物体表面上へ補正目標線として射影する。この時、まず、滑らかにした目標線を元のフィットライン上あるいはその延長線上に射影する方法が考えられるが、Fig. 3.9(b)のように、手振れにより物体の角付近のフィットラインが傾いている時は、射影した目標線が物体表面より離れてしまう場合がある。そこで、提案方法では Fig. 3.9(c)のように、元の物体上目標線座標系で表される物体表面に射影する。これにより、目標線補正時の物体へのめり込みを防ぎつつ、線を滑らかにすることができる。

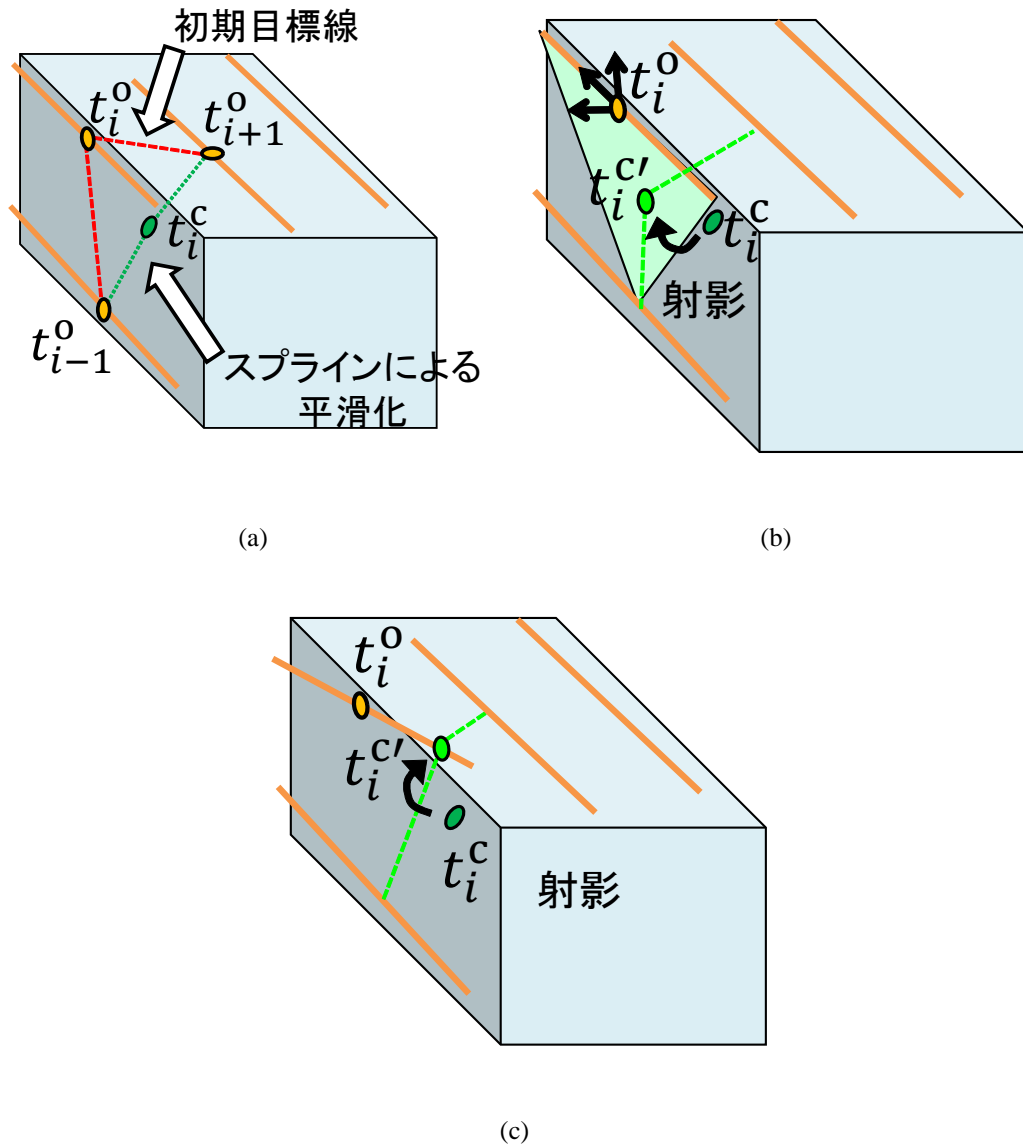


Fig. 3.9: スプライン曲線の射影 (a) スプライン処理による補正 (b) フィットラインへの射影 (c) 物体表面への射影

$$t_i^{c'} = t_i^c - m_i n_i^z \quad (3.6)$$

$$\text{ただし, } n_i^z = {}^W R_{T_i^o}(0,0,1)^T, \quad m_i = n_i^z \cdot (t_i^c - t_i^o),$$

$$t_i^c = (1-s)^2 t_{i+1}^o + 2s(1-s)t_i^o + s^2 t_{i-1}^o, \quad (s=0.5)$$

次に、目標線座標系列の姿勢成分を考慮して、補正目標線の直線部分の間引き処理を行う。これを行う理由としては、第4.1章で述べる手先経路（目標線より生成される布を動かすための手先経路）に影響があるためである。Fig. 3.10に示すように、本来、直線状に並ぶ物体上目標線座標系 $\mathcal{T}_i^o, \mathcal{T}_{i+1}^o, \mathcal{T}_{i+2}^o$ から生成される手先位置 $\mathcal{H}_i, \mathcal{H}_{i+1}, \mathcal{H}_{i+2}$ は同じ位置を指すべきである。しかし、実際は入力の手振れの影響により $\mathcal{T}_i^o, \mathcal{T}_{i+1}^o, \mathcal{T}_{i+2}^o$ 間も振れ、 \mathcal{H}_i 付近で余分に振れる手先経路となってしまう。また、手振れの誤差がなく、手先位置 $\mathcal{H}_i, \mathcal{H}_{i+1}, \mathcal{H}_{i+2}$ が同じ位置を指している場合でも、手先位置 \mathcal{H}_i まで実際のロボットの手先が進んだ時、動作が一時的に止まってしまうという場合がある。一時的に止まってしまう理由は、目標の手先位置が $\mathcal{H}_i \sim \mathcal{H}_{i+2}$ を過ぎるまで、目標位置入力、目標位置到達判定、次の目標位置の入力といった制御シーケンスがロボット内で繰り返されるためであり、これにより、個々のロボットの位置制御の内容によるが、作業時間を長くしてしまうためである。そこで、 $\mathcal{T}_i^o, \mathcal{T}_{i+1}^o$ を間引くことで、この問題に対処する。

一般には以下のアルゴリズムで間引き処理を行う。2つの目標線座標系 $\mathcal{T}_i^o, \mathcal{T}_j^o$ ($j = i+1, i+2, \dots, N$) の目標線の方向を表す x 軸どうし、布が重なる方向を表す z 軸どうしがなす角度 $\theta_{i,j}^x, \theta_{i,j}^z$ を求める（式(3.7)）。

$$\cos \theta_{i,j}^x = \frac{n_i^x \cdot n_j^x}{\|n_i^x\| \|n_j^x\|}, \quad \cos \theta_{i,j}^z = \frac{n_i^z \cdot n_j^z}{\|n_i^z\| \|n_j^z\|}, \quad (3.7)$$

$$(n_k^x = {}^{\mathcal{W}}R_{\mathcal{T}_k^o}(1, 0, 0)^T, \quad n_k^z = {}^{\mathcal{W}}R_{\mathcal{T}_k^o}(0, 0, 1)^T, \quad k = i, j)$$

そして、 \mathcal{T}_i^o から \mathcal{T}_{i+2}^o までのそれぞれの角度が閾値 β_x, β_z 以下だった場合式(3.8),

$$\theta_{i,j}^x < \beta_x \quad \text{かつ} \quad \theta_{i,j}^z < \beta_z \quad (3.8)$$

そして、間引いた分 \mathcal{T}_{i+2}^o 以降の座標系のインデックスを i 番目から振りなおす。このようにして、細かな振れを減らす処理を施す。本システムは、これらの物体上目標線の補正処理によって、手振れの影響を軽減することができる。

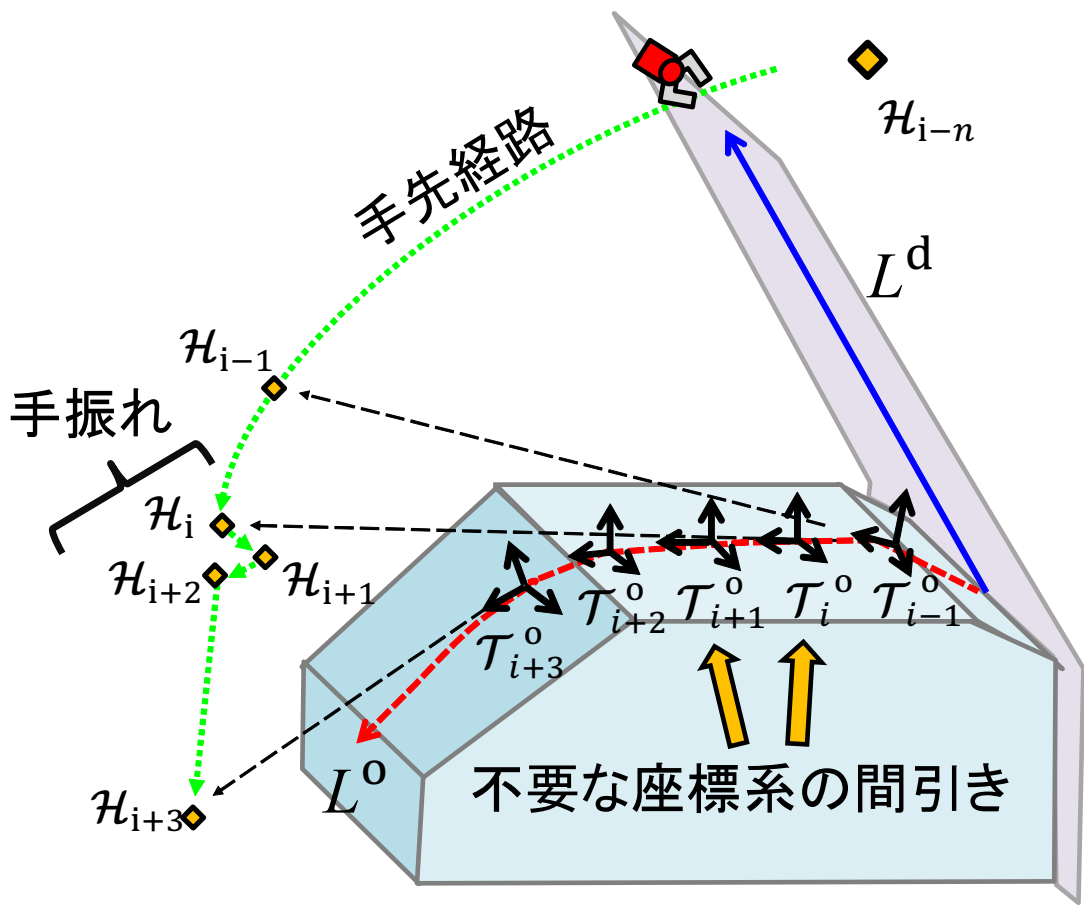


Fig. 3.10: 目標線の直線部分での手先経路の揺らぎ

3.4 実験

本節では，提案手法を評価する実験を行う．まず，3.4.1では実験環境について述べる．3.4.2では，教示デバイスで目標線を入力した時の目標線自体の誤差及び，提案補正方法の効果について述べる．3.4.3では，スムージング処理による物体への目標線めり込み問題（Fig. 3.8）に対して，提案補正方法の効果について述べる．3.4.4では，提案した局所凸化処理が適切な被覆領域を生成できることを述べる．3.4.5では，目標線補正処理の最終的な手先経路への効果について述べる．3.4.6では，教示デバイスで実際に凹凸のある曲面物体に，布の幅に合わせて，適切な目標線が引けることを述べる．

3.4.1 実験環境

ハードウェア構成

次に，教示に用いたデバイス（Fig. 3.11(a)）は，デプスセンサ（asus 製 xtion），磁気式モーションキャプチャ装置（polhemus 製 fastrak）を作成したグリッパに取り付けたものであり，デプスセンサ座標系とモーションキャプチャ装置の座標系は事前にキャリブレーション済みである．また，デバイスをコントロールするために，指輪型プレゼンツール（コクヨ製 ELA-FP1）を用いた．Fig. 3.11(b)に示すように，各ボタンには入力機能として，ボタンを押している間，フィットラインの入力が行われる，強制的に現在のフィットラインを入力する，現在のフィットラインを消すなどを割り当てた．Fig. 3.12は，教示中に入力を確認するためのフィードバックディスプレイであり，デバイスの RGB カメラ画像が映る画面中には，現在のスキャンラインや入力された目標線，フィットライン群などの情報が表示される．



(a)



(b)

Fig. 3.11: 教示デバイス (a) 外観 (b) 機能が割り振られているボタン

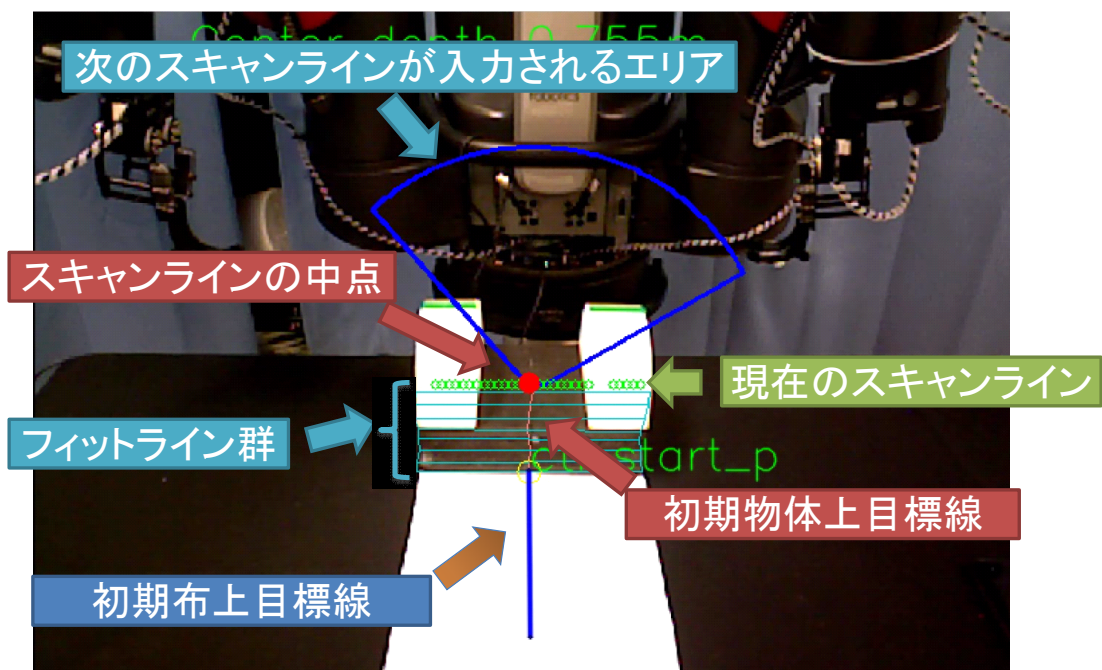


Fig. 3.12: フィードバックディスプレイ

ソフトウェア構成

本システムは各機能がROS（Robot Operating System）[69]のモジュール群として実装されている（Fig. 3.13）。ROSはオープンソース・ロボティクス財団によって開発されているフリーのロボットフレームワークである。教示デバイスによるユーザーの教示データから、第3.1節で述べた目標線生成方法を用いて、目標線を生成している。

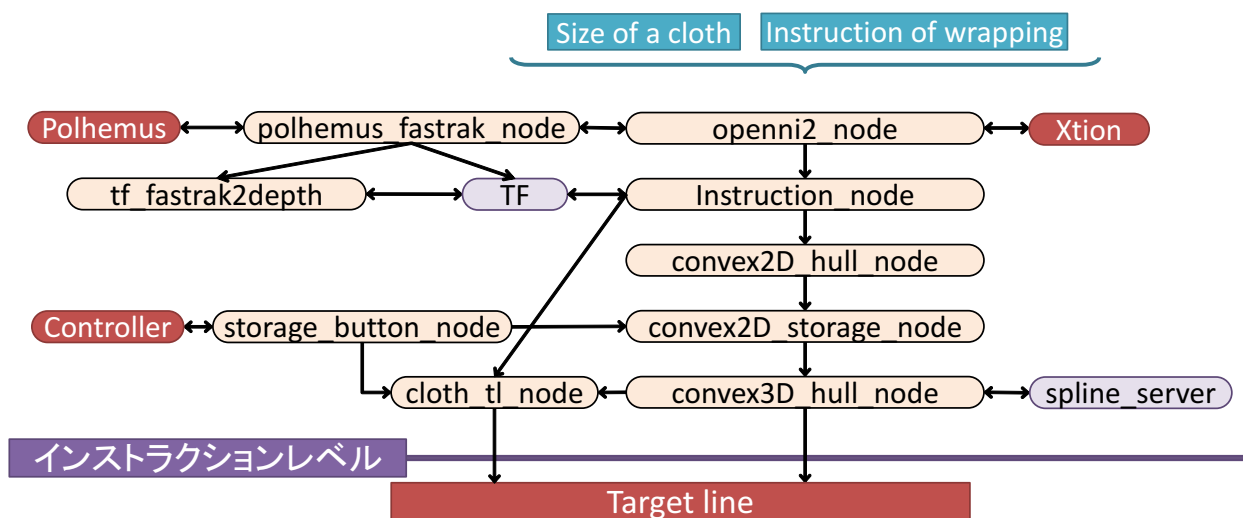


Fig. 3.13: ソフトウェア構成

パラメータ設定

第3.1節の式(3.3)で述べた目標線入力判定の閾値は、 α は1 cm、 β は 45° とした。なお、これらのパラメータは物体の形状や、スキャンラインで表される被覆領域が要求する再現精度を考慮して設定する。

3.4.2 目標線入力及び補正実験

この実験では、教示デバイスを用いた教示から目標線の入力を行う。教示デバイスを用いて入力したい主な目標線は、直線と、緩やかな曲線である。そこで、本実験では直線と緩やかな曲線を入力目標線とする。この入力目標線と実際に入力された目標線との誤差を求める。また、線に乗る手振れのノイズを3.3で述べた補正処理で軽減した場合の、入力目標線と補正後の目標線との誤差についても評価を行う。入力する直線、曲線は以下のガイドラインの線とする。

Case1: Fig. 3.14(a)のように、36 cm の高さの机の上に 50 cm の直線ガイドラインを配置。

Case2: Fig. 3.14(b)のように、36 cm の高さの机の上に半径 10 cm の円柱上に円周 90° 分の曲線ガイドラインを配置。

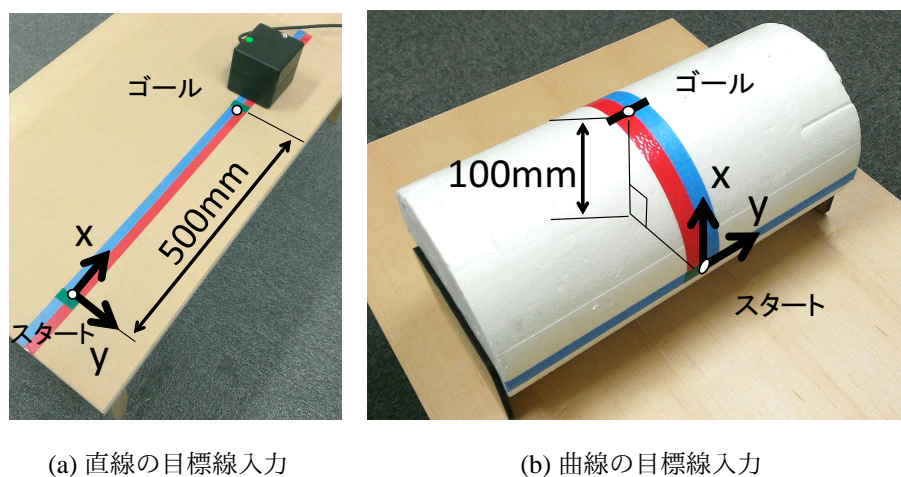


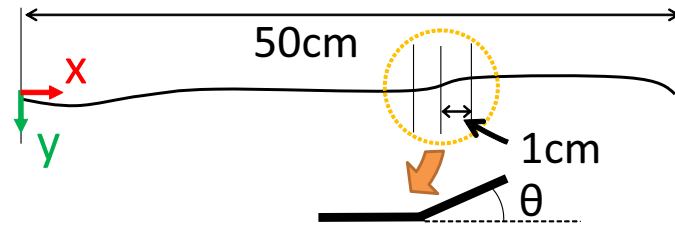
Fig. 3.14: 教示環境

実際の入力時には、ガイドラインを紙で隠した状態で、元のガイドラインと同じようになるように目標線の入力を行う。今回の教示デバイスの最短センシング距離は80cmであり、実験中はそれ以上離れた高さで入力作業を行っている。入力は以下の条件で、10回ずつ入力を行う。

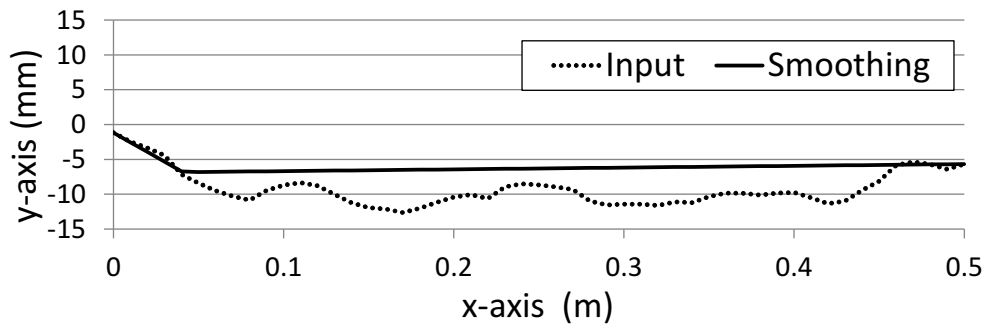
- 線の始点としてスタートポイントは予め入力してある。
- フィードバックディスプレイを見ながらデバイスで入力する。
- スタートからゴールまで手を止めず、動かし続けて入力する。

実際に入力した目標線（Input）に提案補正処理を行い、補正目標線（Smoothing）を生成する。これらの線（Input,Smoothing）の滑らかさを測る。本実験では、Fig. 3.15(a)に示すように、直線はx軸方向1cmごと、緩やかな曲線は円周方向1°ごとに線分として分割し、手振れによる線の振れとして、隣り合う線分どうしのx軸成分の角度を計算する。この線分どうしの成す角度の線全体での絶対値平均角度を滑らかさの指標として、入力した線ごとに求める。

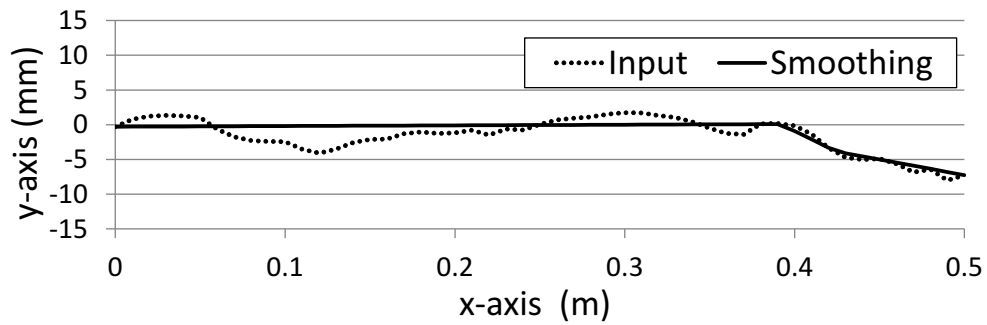
Table 3.1に結果として、入力10回分のガイドラインと目標線のy軸方向の誤差の絶対値平均 μ_y と絶対値平均角度の10回分の平均角 μ_θ を示す（カッコ内は標準偏差）。まず、平均誤差は5mm前後に収まり、そして、Case1,2とも、補正処理により、平均角度が角度が小さくなり、入力された目標線の手振れの影響を減少させていることがわかる。特に、平面上に入力したCase1（直線状の目標線）は間引き処理の効果で、入力した目標線と比較して、補正後の目標線は角度の絶対値平均角度が大幅に小さくなっている。この間引き処理の効果の典型例として、Fig. 3.15(b,c)にCase1の入力した目標線と補正目標線を示す。このように、手振れの影響により振れている目標線が補正処理により滑らかにされ、直線に近づけられているのがわかる。また、さらに実験3.4.5では、本実験の目標線を滑らかにした結果が、具体的に実際の被覆操作に必要な手先経路にどのような効果をもたらすかを示す。



(a) 線の分割と角度計算



(b) 結果例 1



(c) 結果例 2

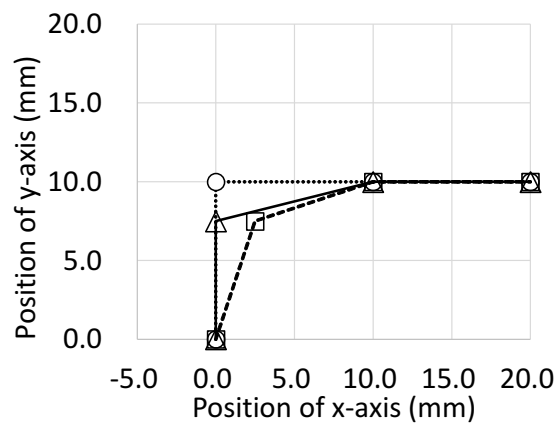
Fig. 3.15: 補正処理の結果

Table 3.1: 教示結果 (標準偏差)

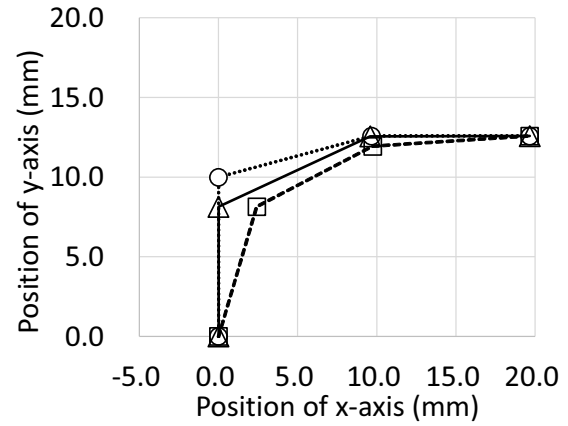
	Case1(line)		Case2(curve line)	
	μ_y [mm]	μ_θ [$^\circ$]	μ_y [mm]	μ_θ [$^\circ$]
Input	4.8 (2.2)	3.85 (0.84)	5.1 (2.5)	1.5 (0.6)
Smoothing	4.1 (1.9)	0.63 (0.42)	5.0 (2.5)	0.6 (0.2)

3.4.3 補正処理のめり込み減少効果の評価実験

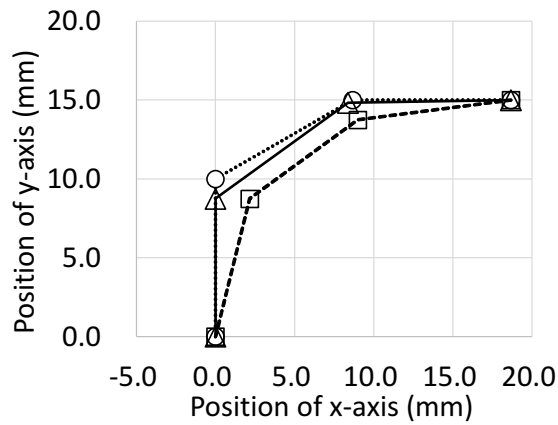
この実験では、提案補正方法のめり込み防止の効果を評価する。まず、角形状(0,15,30,45°)に沿った目標線(例 Fig. 3.16)、円周形状(90°を2~10分割で作成)に沿った目標線(例 Fig. 3.17)の2種類を作成する。これらの結果例の図は、角や曲面上の目標線(Input data)を横から見たものにならうようにプロットされている。この線について、スプライン補正(Conventional)と提案方法(Proposed)により補正を行い、元の目標線の表す角へのめり込み度合いを評価する。そのために、元の目標線の長さ、生成された補正目標線の長さを比較した。Fig. 3.18のように元の目標線と提案方法を用いた補正目標線の長さの変化は角状、円周状それぞれ一般的な補正方法より小さくなり、一般的な補正法よりめり込みを少なくしていることがわかる。布の巻き終わりが物体の角付近にあるケースでは、物体と手先が接近する可能性がある。このような時に干渉回避システムが働いている場合、動作が停止してしまう可能性がある。本手法を用いてめり込みを防ぐことにより、このような状況を減らすことができる。



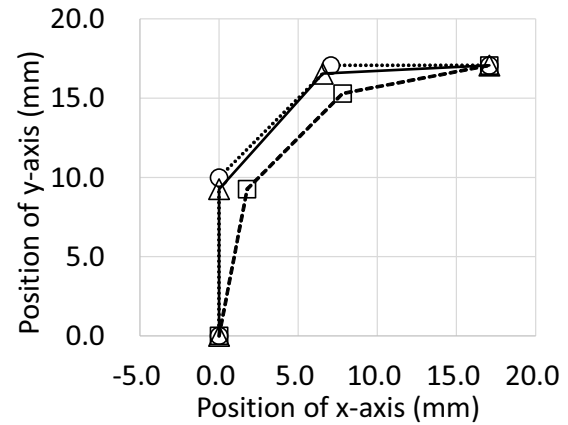
(a) 角上の目標線 (0°)



(b) 角上の目標線 (15°)



(c) 角上の目標線 (30°)



(d) 角上の目標線 (45°)

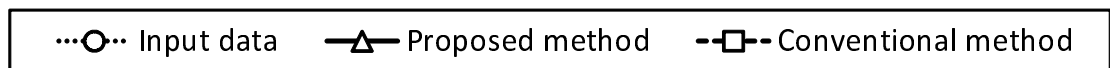
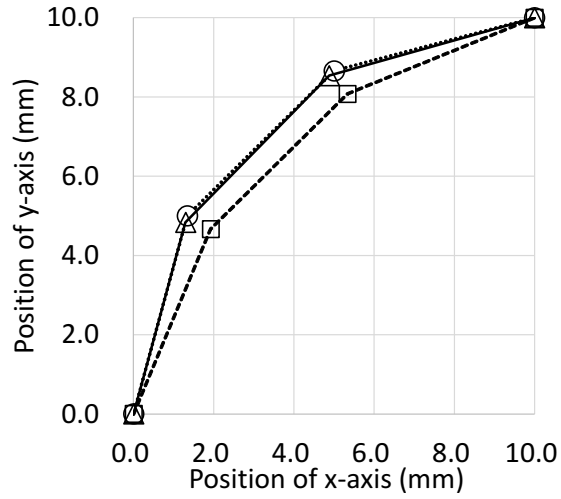
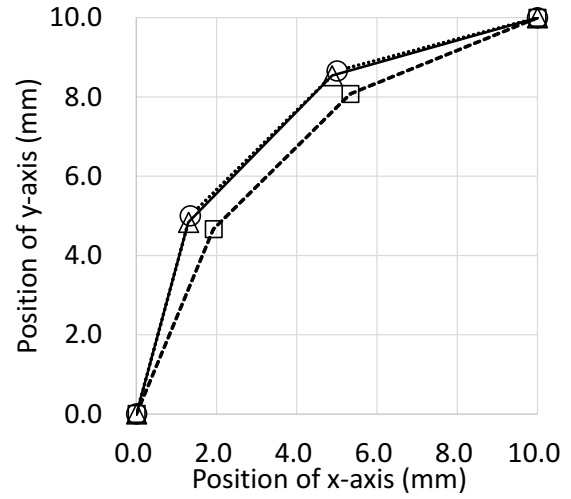


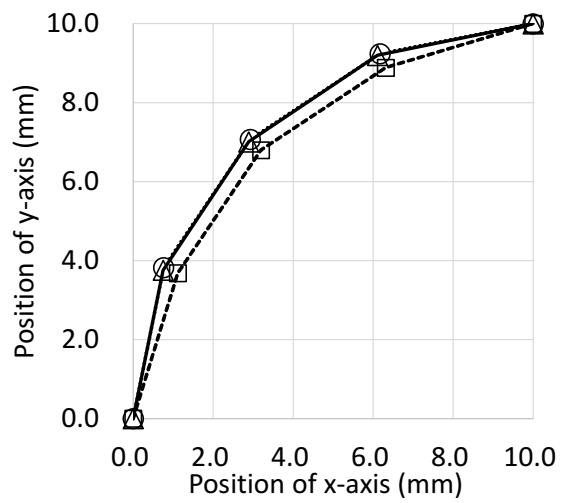
Fig. 3.16: 角部分へのめり込み補正の結果例



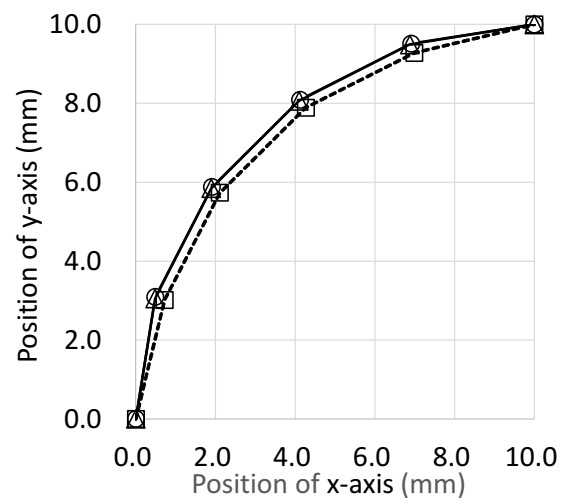
(a) 曲面上の目標線 (3点構成)



(b) 曲面上の目標線 (4点構成)



(c) 曲面上の目標線 (5点構成)



(d) 曲面上の目標線 (6点構成)

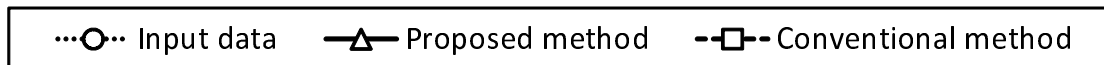
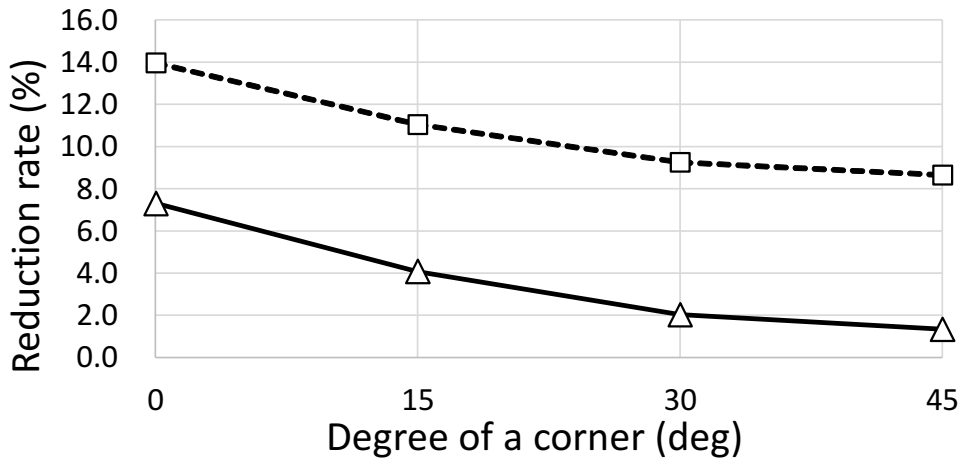
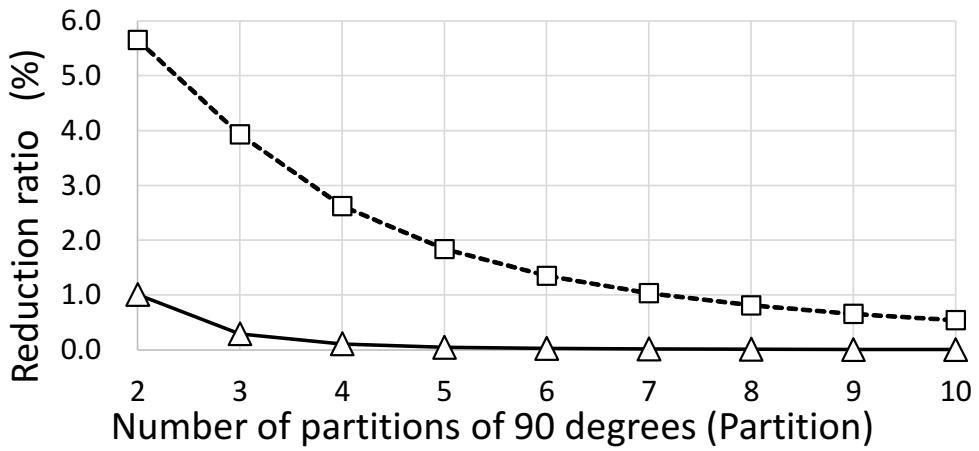


Fig. 3.17: 曲面部分へのめり込み補正の結果例



(a) 減少率 (角)



(b) 減少率 (曲面)



Fig. 3.18: りり込み補正の結果

3.4.4 凹凸を考慮した被覆領域の生成

この実験では、入力されたフィットライン群に凸化処理を行い、物体上目標線を生成するシミュレーションを行った。実験は、Fig. 3.19(a)に示す凹凸のある円柱に矢印 (Fig. 3.19(b)) のように布を巻いていくものとする。初めに、Fig. 3.19(c)に示すように、円柱表面にフィットライン列を作成した。次に、Fig. 3.19(d)に示すように、Fig. 3.19(c)のフィットライン列に凸化処理を行った。これにより、生成された物体上目標線がFig. 3.19(e)である。

この凸化処理及び目標線生成の結果について、円柱の上部、中部、下部に分けて述べていく。まず、円柱上部は、円柱の一部に凹部分がある形状をしており、この凹部を跨ぐようにフィットラインが入力されている。ここでは、一般的な凸化処理と同じように、局所凸化手法で凹部を塞ぎ、凹部を跨ぎ布を巻くための目標線を生成することができた。

次に、円柱中部は、半円の形状をしており、円柱全体でみると、この溝の部分に布を巻き付けるようにフィットラインが入力されている。一般的な凸化処理では、フィットライン列をFig. 3.19(f)のような点群に見なし、Fig. 3.19(g)のように塞いでほしくない凹部分まで塞いでしまう。それに対して、本手法ではこの凹部を凸化せず、入力の意図通りに、凹部に布を巻き付けるための目標線を生成することができた。

最後に、円柱下部は、凹部がない形状をしており、この部分に布を重ねて巻き付けるようにフィットラインが入力されている。ここでは結果として、同じ部分に重なっているフィットライン列を併合することなく、重ねて巻き付けるための目標線を生成することができた。

このように、提案した局所凸化手法により、被覆に適した凸化処理を行い、入力されたフィットライン列に従った目標線を生成できることが確認できた。

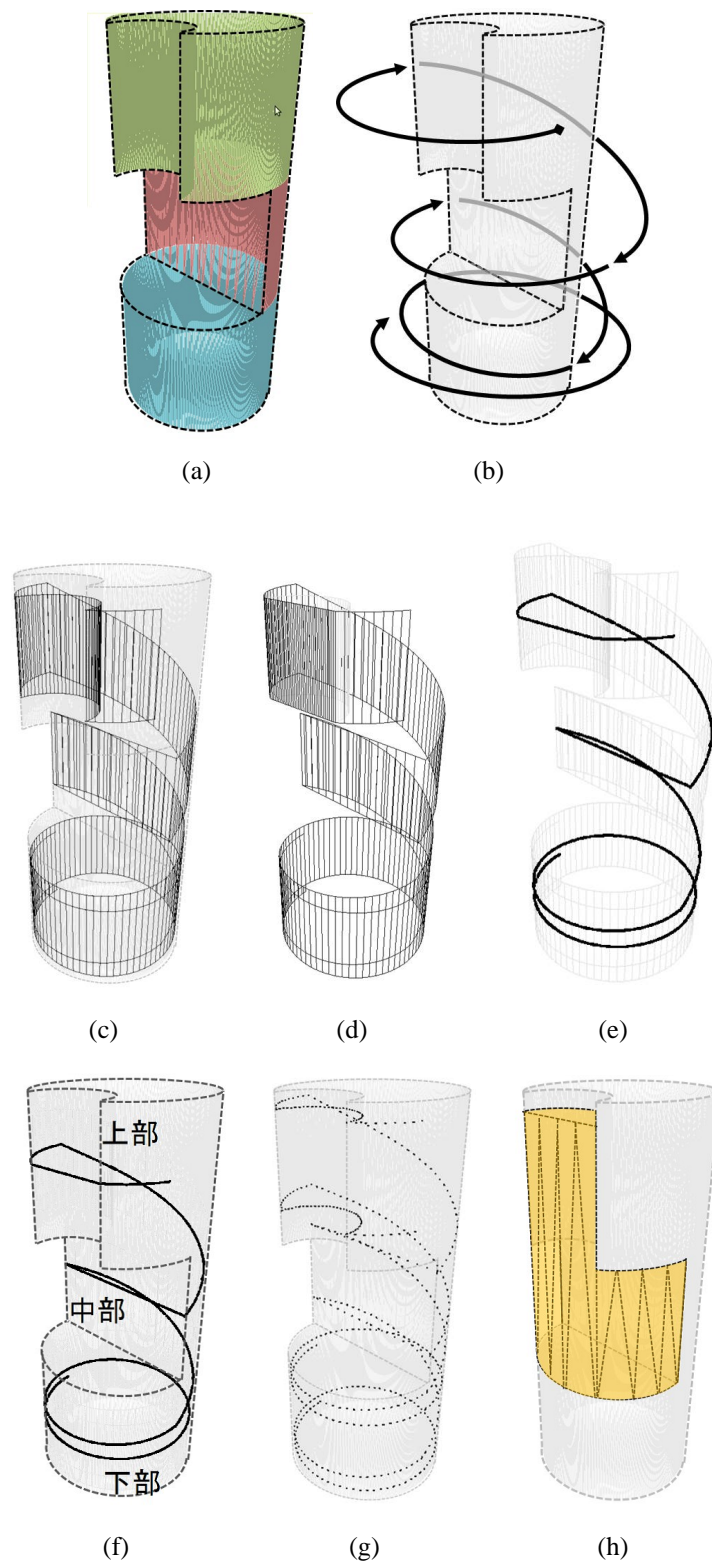


Fig. 3.19: シミュレーション結果 (a) 円柱 (b) 巻き方 (c) フィットライン群 (d) 局所凸化処理の結果 (e) 生成された目標線 (f) 円柱の各部分 (g) フィットライン群の各部分 (h) 従来の凸包処理を用いた場合

3.4.5 補正目標線を用いた手先経路の生成実験

本実験では、補正目標線から生成される手先経路の評価を行う。本実験では、まず、実験 3.4.2 で扱った直線上の入力目標線と補正目標線を、Fig. 3.20 のような箱上面を表す目標線であると想定する。そして、箱を布で覆うために、60 cm の布上目標線を作成し、この布上目標線と実験 3.4.2 の入力 10 回分の入力目標線と補正目標線より手先経路を生成した。

ここでまず、手先経路生成方法の詳細については 4.1 で述べるが、この箱上面の目標線から生成される手先経路がどのような位置にくるか説明する。Fig. 3.20 の布を把持している手先が次に目指す手先位置について、振れのない直線状の目標線が箱上面に記されている場合、その目標線から生成される経由点（手先経路を構成する点）は、すべて箱上平面の先にある一点（点 **P**）に生成される。しかし、手振れの影響を受けた直線状の目標線の場合、その目標線から生成される経由点は点 **P** の左右にふらついて生成されてしまう。

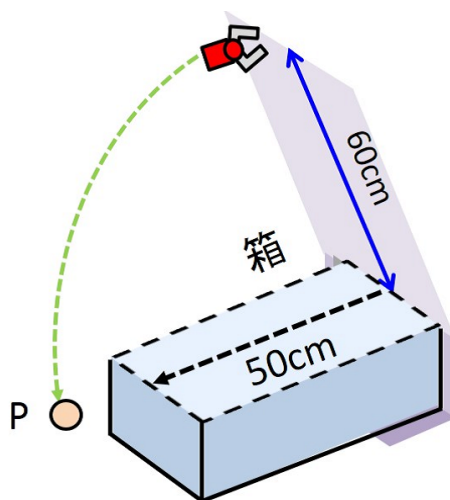
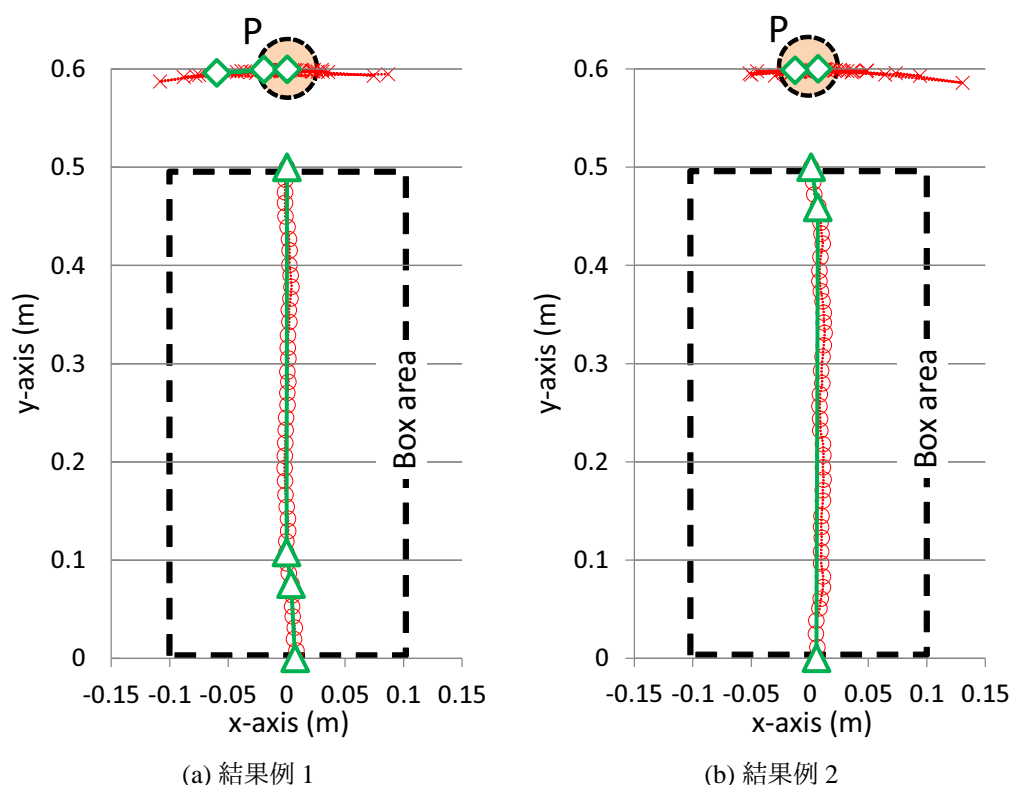


Fig. 3.20: 手先経路生成の実験構成

Table 3.2: 手先経路の結果（標準偏差）

	μ_s [point]	μ_e [m]
Input	42.3 (0.8)	0.04 (0.03)
Smoothing	5.2 (2.4)	0.03 (0.01)
Decreasing rate	85%	-

次に、実際の入力 10 回分の目標線から生成された手先経路について、Table 3.2 に評価結果を示す。手先経路の経由点の数について、10 回分の平均値を μ_s として示す。そして、各経由点の理想的な点 \mathbf{P} からの誤差距離の平均を計算する。その平均距離誤差の 10 回分の平均値を μ_e として示す。加えて、補正前と補正後での経由点数の減少率を示す（カッコ内は標準偏差）。また、経由点の左右の振れの典型例として、Fig. 3.21(a,b) に箱上面から見た目標線と経由点を示す。これらのように、大幅に入力時の手振れの影響によるふらつきを抑え、経由点を減らすことができているのがわかる。補正前の目標線からでは左右に大きく繰り返して振れる手先経路を生成してしまい、この振れは布を角にひっかけたり、大きな皺を生む原因となる。この問題に対し、3.4.2 の補正処理実験及び、その線を用いた手先経路生成の本実験により、提案補正方法を用いることで、大きな左右への繰り返しの振れを、大幅に少なくすることができることを示した。



× Hand Path (input) ◆ Hand path (smoothing) -○- Target line (input) -△- Target line (smoothing)

Fig. 3.21: 手先経路の結果例

3.4.6 大まかな指示を用いた被覆作業の記述

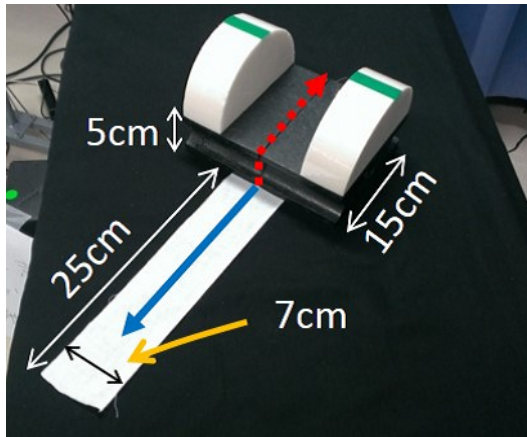
この節では、提案した教示法によって物体へ目標線を用いて被覆作業の記述をする実験を行った。

凹凸を含む曲面形状への目標線を用いた被覆

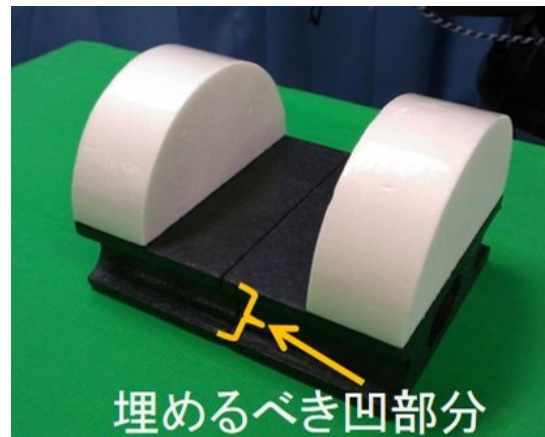
この実験では、凹凸を含む曲面物体に目標線を用いて被覆作業の記述をする実験を行う。以下の図中、実際に入力されたフィットライン群と生成された目標線はグレーと黒色の線で表示し、データが物体に対して、どのように入力されたかわかりやすくするために水色の物体の図を加えた。

初めに、幅の狭い布で Fig. 3.22(a) に示す目標線ペアのように物体を布で包むとする。この時、布の幅より物体の埋めるべき凹部分は (Fig. 3.22(b)) の部分となる。デバイスから入力されたフィットライン群 (Fig. 3.22(c)) が、凸包処理により埋められ (Fig. 3.22(d))、これから目標線ペアを生成した (Fig. 3.22(e))。このように物体の考慮すべき凹部分のみを埋めた目標線を生成することができていることがわかる。

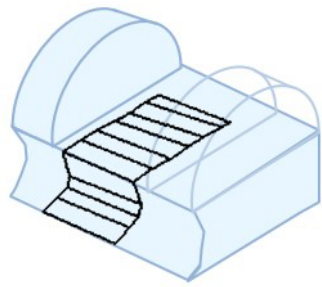
次に、幅の広い布で Fig. 3.23(a) に示す目標線ペアのように物体を布で包むとする。この時、布の幅より物体の埋めるべき凹部分は、幅の狭い布の時と違い (Fig. 3.23(b)) の部分となる。実際にデバイスで教示する時、布の幅を考慮することにより、物体上部の半円柱からなる凹部分は埋めることができ、布幅に適したフィットライン群 (Fig. 3.23(c)) を生成することができた。さらにフィットライン群の凹部分が凸包処理により埋められ (Fig. 3.23(d))、これから目標線、そして、その目標線ペアを生成した (Fig. 3.23(e))。このように物体の考慮すべき凹部分のみを埋めた目標線を生成することができていることがわかる。



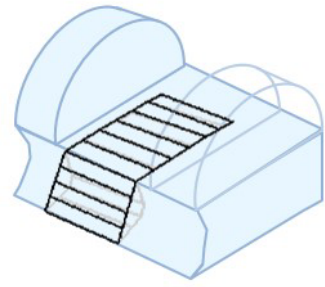
(a)



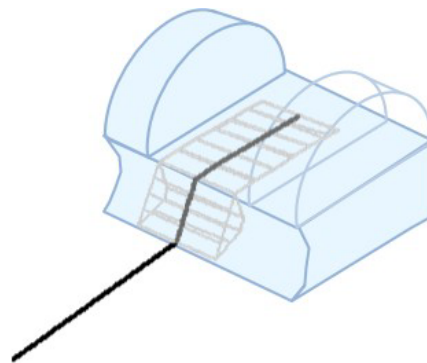
(b)



(c)

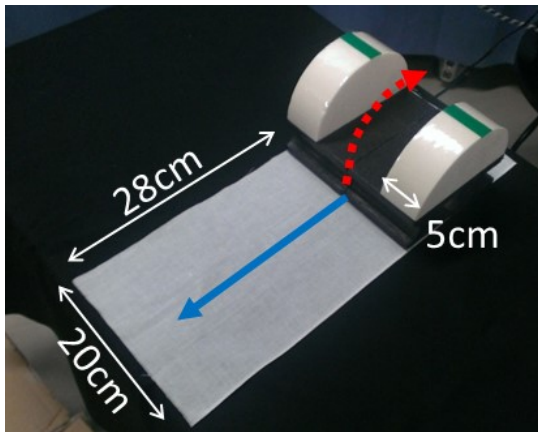


(d)

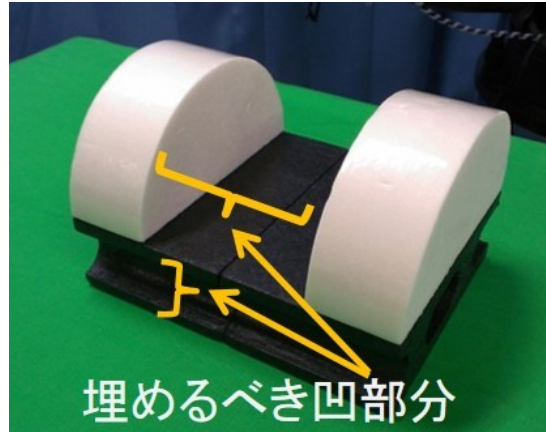


(e)

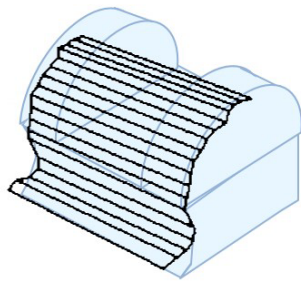
Fig. 3.22: 幅の狭い布による被覆 (a) 包み方 (b) 埋めるべき凹部分 (c) フィットライン群 (d) 凸化されたフィットライン群 (e) 目標線



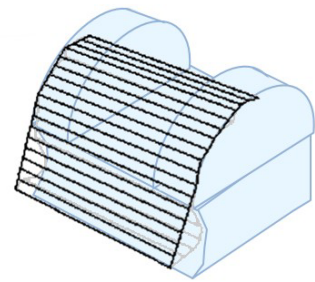
(a)



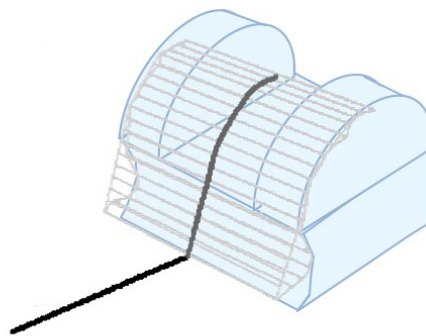
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 3.23: 幅の広い布による被覆 (a) 包み方 (b) 埋めるべき凹部分 (c) フィットライン群 (d) 凸化されたフィットライン群 (e) 目標線

3.5 まとめ

本章では，目標線を大まかな指示を用いて直感的に記述する方法について述べた．本研究では，教示デバイスを用いた大まかな指示によって，目標線による被覆作業の記述を実現した．その中では，大まかな指示を行っている時の手のブレを補正する手法と，第2.3節で述べた局所凸の被覆領域を適切に生成する手法について述べた．実験では，各提案手法についての評価実験を行い，その効果を示した．また実際に，凹凸のある曲面物体に作業教示を行い，大まかな指示から被覆作業の記述が出来ることを示した．

第4章 ロボット動作の生成

前章では，被覆作業モデルの中心となるインストラクションレベルについて述べた．本章では，目標線からロボットの動作を生成する方法について述べる．三階層モデルの中では，ハンドリングレベルとロボットレベルに当たる．

4.1 目標線からの手先経路生成（ハンドリングレベル）

本節では，目標線から，把持点を考慮し手先経路を生成する方法について述べる．また，その手先経路を適切に補正する方法について述べる．

4.1.1 手先経路の生成方法

手先経路生成方法は目標線と布の把持点の関係から，実際に布を動かすための右手と左手の手先経路 h^r, h^l を生成する．実際には，手先経路上に座標系 $\mathcal{H}_i^r, \mathcal{H}_i^l$ ($i = 0, 1, \dots$) を考え，ワールド座標系 \mathcal{W} からの同次座標変換行列を求める（式 (4.1)）．

$${}^w T_{\mathcal{H}_i} = \begin{pmatrix} {}^w R_{\mathcal{H}_i} & {}^w t_{\mathcal{H}_i} \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

ただし， $\mathbf{0}_3 = (0, 0, 0)^T$ である．

ロボットが布を把持する位置として，両手で把持する場合は，Fig. 4.1 に示すように，被覆開始時点の右手と左手の手先経路座標系 $\mathcal{H}_0^r, \mathcal{H}_0^l$ を設定する．この被覆開始時点の手先経路座標系を手先経路の始点とし，手先経路を生成していく． i 番目の物体上と布上目標線座標系どうしを重ねるための右手と左手の手先経路座標系 $\mathcal{H}_i^r, \mathcal{H}_i^l$ は，布上目標線座標系 \mathcal{T}_i^d と

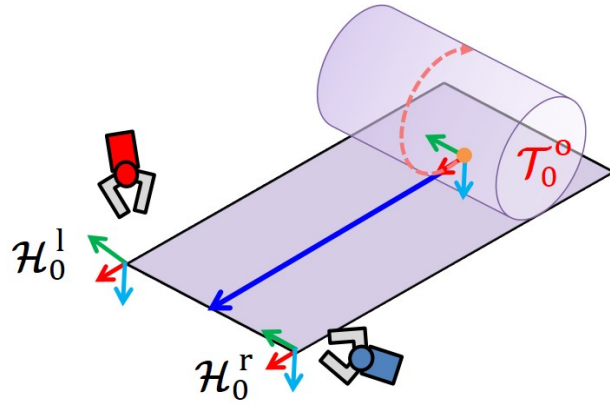


Fig. 4.1: 把持点

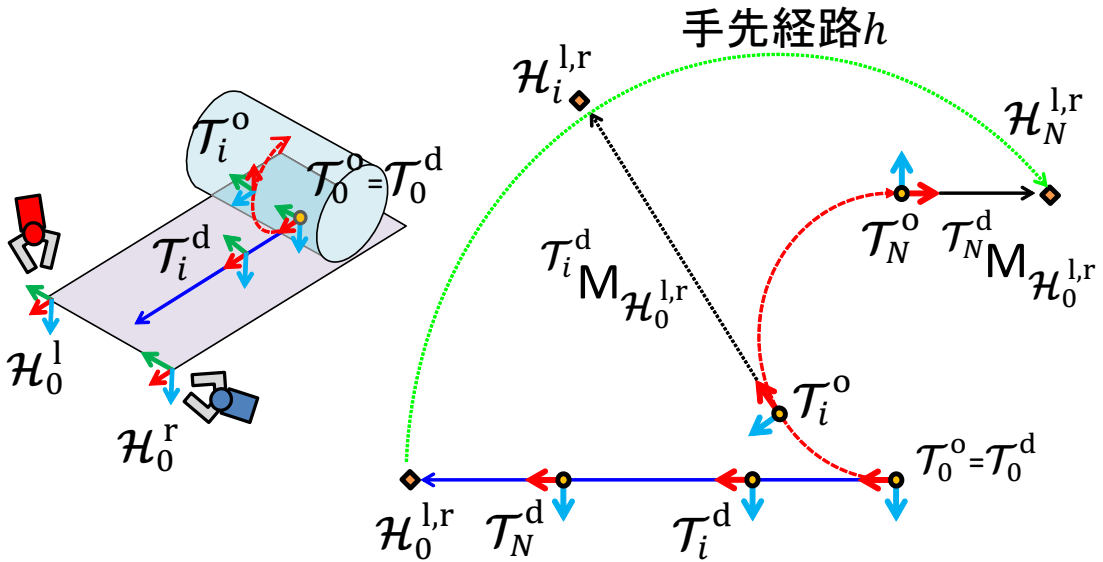


Fig. 4.2: 手先経路生成

手先経路座標系 \mathcal{H}_0 との初期位置関係，物体上目標線座標系 \mathcal{T}_i^o より求める (Fig. 4.2) . 手先経路座標系 \mathcal{H}_0 から布上目標線座標系 \mathcal{T}_i^d への同時変換行列を ${}^{\mathcal{T}_i^d}T_{\mathcal{H}_0}$ とする時，手先経路座標系からワールド座標系への同時変換行列は，式 (4.2) に示すように計算する.

$$\begin{aligned} {}^wT_{\mathcal{H}_i^r} &= {}^wT_{\mathcal{T}_i^o} {}^{\mathcal{T}_i^d}T_{\mathcal{H}_0^r}, \\ {}^wT_{\mathcal{H}_i^l} &= {}^wT_{\mathcal{T}_i^o} {}^{\mathcal{T}_i^d}T_{\mathcal{H}_0^l} \end{aligned} \quad (4.2)$$

本研究では，布の力学モデルや状態フィードバックを用いた高精度の位置合わせ作業は対象としていない．本研究は初期目標として，風呂敷包みなどの日常作業によく見られるよう

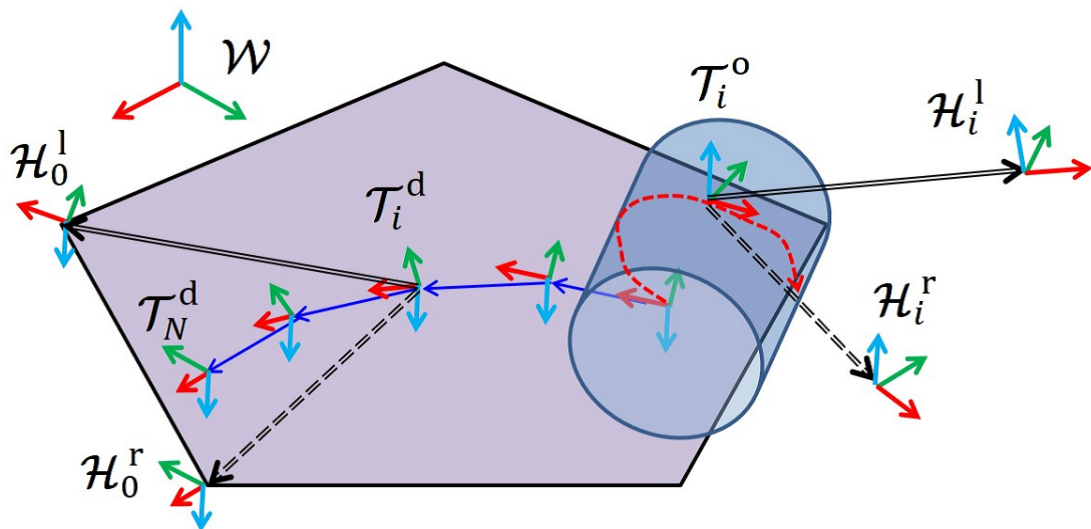


Fig. 4.3: 手先経路生成（長方形以外の布の場合）

な，大まかに布を合わせる操作の実現を目指している．そのため，今回の操作では布の弛みを考慮しないものとする．それにより，手先位置が \mathcal{H}_i で i 番目の目標線座標系どうしまでが重なっている時，布上目標線座標系 \mathcal{T}_i^d から手先位置 \mathcal{H}_i までの布は，弛まずに平面形状を保っていると見なす．この手先経路生成方法により，目標線から手先経路を生成することができる．この手先生成手法により，布が長方形でなくても把持位置を指定すれば，手先経路を生成することができる（Fig. 4.3）．

4.1.2 手先経路の補正処理

物体の角上での目標線から生成される手先経路は Fig. 4.4(a) のような $\mathcal{H}_i, \mathcal{H}_{i+1}$ を結ぶ直線経路となる。布の把持点 \mathcal{H}_i と \mathcal{T}_i^o の位置関係を布に維持したまま、 \mathcal{H}_{i+1} まで手先を移動させることを考慮すると、 \mathcal{H}_a を経由するような円弧上の経路で布を移動させるのが理想的である。このように、 $\mathcal{H}_i, \mathcal{H}_{i+1}$ 間の中点を \mathcal{H}_b とすると、物体上目標線座標 $\mathcal{T}_i^o, \mathcal{T}_{i+1}^o$ 間の姿勢が大きく変わるほど、 \mathcal{H}_a と \mathcal{H}_b の差が大きくなってしまう。この問題を避けるために、本手法では2つの目標線座標系 $\mathcal{T}_i, \mathcal{T}_{i+1}$ の姿勢変化 $\theta_{i,i+1}^x$ が閾値 β_h 以上の場合、経路間を円弧状に補間する (Fig. 4.4(b))。ワールド座標系から見た目標線座標系 \mathcal{T}_i の姿勢のクォータニオンを $q^{\mathcal{T}_i}$ とし、2つの目標線座標系間を n 分割して円弧補間する。そのために式 (4.3) に示すように、クォータニオンの球面線形補間を用いて2つの目標線座標系姿勢間の補間姿勢 q_k^{int} を生成する。

$$q_k^{\text{int}} = \frac{\sin\left(\left(1 - \frac{k}{n}\right)\omega\right)}{\sin\omega} q^{\mathcal{T}_i} + \frac{\sin\left(\frac{k}{n}\omega\right)}{\sin\omega} q^{\mathcal{T}_{i+1}} \quad (4.3)$$

ただし、 $\omega = \cos^{-1}(q^{\mathcal{T}_i} \cdot q^{\mathcal{T}_{i+1}})$, ($k = 0, 1, \dots, n$) とする。これを元に、円弧状に補間する手先姿勢 $\mathcal{H}_k^{\text{int}}$ を配置する。この補間手先姿勢 $\mathcal{H}_k^{\text{int}}$ を経由して手先を移動させる。この補正処理によって、移動中の布が弛まないように、布を動かすことができる。

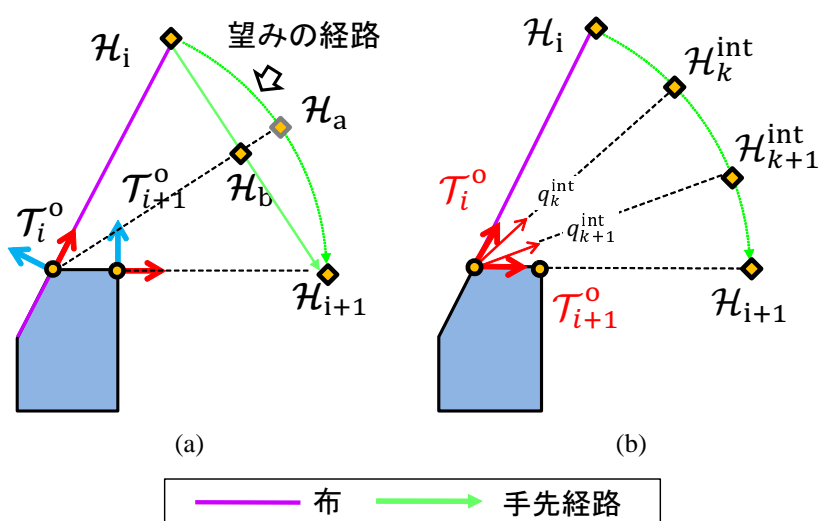


Fig. 4.4: 手先経路の補正処理

4.2 手先経路からのロボット動作の生成（ロボットレベル）

本節では，手先経路からロボット動作を生成するための手法について述べる．前節のように，面状柔軟物で物体を被覆するための手先経路が与えられても，実際のアームロボットでは以下のような問題に直面する．

- 逆運動学（IK）が解けない
- 関節角軌道が不連続になる
- 物体との干渉が生じる

一般的に，ピックアンドプレイスと呼ばれるような物体を把持し移動させる作業の場合，ロボットは目標位置を目指して手先を移動させようとする．そのために，ロボットは経路計画を用いて，実行可能な初期一目標位置間の経路を見つけなければならない．その時，経路計画では，特にアームが環境上の物体と干渉しないような経路を見つけることが重要視される．また，手先経路が，ぎくしゃくした軌道にならないように滑らかに補間したり，最短経路になるようにショートカット処理が施される．現在，マニピュレーションの経路計画手法としては，ダイグストラ法 [70] や A* [71] のようなグラフを用いたヒューリスティック探索手法 [72–78]，PRM [79] や RRT [80] のようなサンプリングベース探索手法 [81–83]，CHOMP [84] や STOMP [85] のような初期軌道を修正していく軌道最適化手法 [86, 87] が挙げられる．

一方，布による物体への被覆操作の場合，ピックアンドプレイスのように，干渉回避しながら目標位置一点に向けて布を動かせばいいというわけではない．布を常に指定された経路通りの位置姿勢で動かし，物体から布がずれたり皺にならないように被せていく必要がある．そのため，ある手先位置から次の位置へ不連続的に進むという状況は避けなければならない．不連続的に進むという状況について，例を挙げて説明する．Fig. 4.5(a) のように，先端のアーム関節 Joint1 が無限回転できる関節で， $-180^\circ \sim 180^\circ$ の範囲を回転できる関節があるとする．この場合は，A の Joint1 目標関節角 -174° ，B の Joint1 目標関節角 -179° ，C の Joint1 目標関節角 176° と姿勢を変えながら手先を動かす場合，Joint1 関節角を -5° ずつ

回転させれば良い。一方, Fig. 4.5(b)のように, 先端のアーム関節 Joint1 が無限回転できる関節ではなく, $-179^\circ \sim 179^\circ$ の範囲しか回転できない関節があるとする。このような制約を持つアームが, B の Joint1 目標関節角 -179° まで進んだ時, その状態から CS の目標関節角 176° を目指すとする。すると, 関節角を次の目標値 176° へ動かそうとしても関節角限界を跨げないため, Joint1 を大きく $+355^\circ$ 回転させなければならない。手先経路経由点に沿って少しずつ布を物体に巻いている時に, このような急に関節を回転させなければならない状況が起きると, 手先で布を大きく巻き取ってしまう場合が発生する。被覆操作の場合は, 常に明示的に指示された手先経路通りに布を移動させなければならないので, この関節が不連続的に進むという状況は避けなければならない。

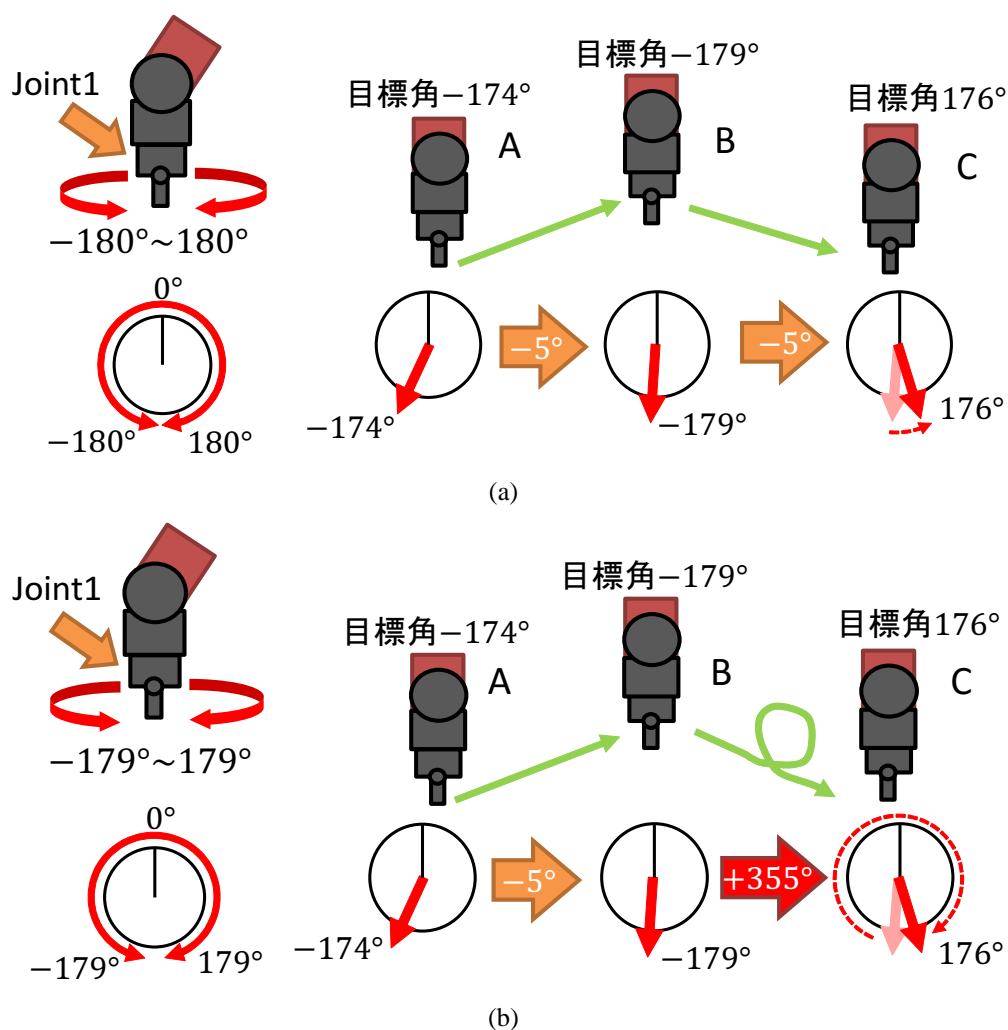


Fig. 4.5: 関節の可動域制限 (a) 例 1 (b) 例 2

実際，ロボットが手先経路どおりに布を掴んで動かす時，上記の問題が発生して，最初の把持状態から経路の最後まで到達することができない場合が多い．そのため，双腕アームを用い，経路の途中でもう片方の手に布を渡したり（本論文では以降，持ち替え操作と呼ぶ），布を掴み直す（本論文では以降，持ち直し操作と呼ぶ）必要がある．

しかし，手先経路中，どこでどのような把持姿勢で持ち替え・持ち直し操作を行うかには無数の選択肢があり，その中の一つの組み合わせを選択し，実行しなければならない．このように，手先経路が与えられた時に，IKなどを考慮し，実行可能な持ち替え，持ち直しタイミングを計画する必要がある．これらの問題を解決するために，本研究では，ロボットごとの実行不可能な動作範囲を避け，そして，なるべく成功しそうな位置で持ち替えや持ち直し操作を行う動作計画手法を提案する．

4.2.1 持ち替え・持ち直し操作

ここでは、本システムで用いた持ち直し・持ち替え操作 (Fig. 4.6) について述べる。ロボットによる持ち替え・持ち直し操作として、複数のアームロボット間 [88–97] や多指マニピュレータ内 [98–102] での物体の受け渡しや把持姿勢の変更などの研究が行われてきた。一般的に、これらの研究は把持物体の変形がない剛体が対象とされている。それに対し、本研究で扱う布は柔軟物であるため、布の向きや布を押さえる位置によって把持している布の形状が変わってしまう。そのため、柔軟物の持ち替え・持ち直し操作は、それらの影響により状況によって、操作の確実性が変化する。動作計画手法は、この問題を考慮して、操作の選択、操作を行う位置の選択をする必要がある。今回、作成した操作は、実験に用いた二指グリッパに合わせて作成したものであるが、どのようなグリッパでも持ち替え・持ち直しを行う上で問題となる重力による布のたるみへの対処へは、別のグリッパに合わせた動作を作成する上で知見になりうると考える。

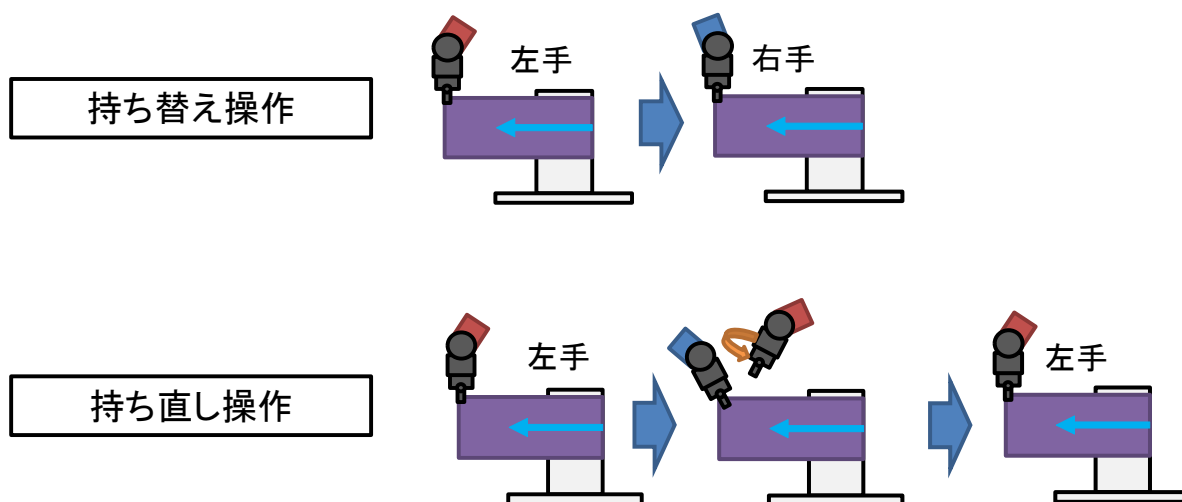


Fig. 4.6: 持ち替えと持ち直し操作の概要

持ち替え操作

ここでは、本システムで用いた持ち替え操作について説明する。Fig. 4.7は持ち替え操作の手順の一例を示したものである。持ち替え操作は条件によって、布の初期把持角度・目標把持角度が変わる。持ち替え操作は、空いている方のハンドで、布を押さえ、その間に、掴んでいた方のハンドを離して移動し、再び掴み直す。そして、布を押さええていた方のハンドを再び離して移動させ、目標把持姿勢まで行く。この時、布を片方の手で押さええているだけで、布が重力により垂れ下がってしまう場合がある。そこで、布を一度、離して姿勢を変えたり移動しているハンドについて、ハンドは完全には布から離れず、開いたグリップの間で布が垂れないように拘束しながら、移動していく。片腕で押さえ、もう片方を移動させ再び掴み直し、押さええていた方を移動させる動作が一回だけでは、目標の把持姿勢に到達できない場合がある。そのため、本システムでは布を離して移動し、再び掴むというのを組み合わせて持ち替え操作を行う。

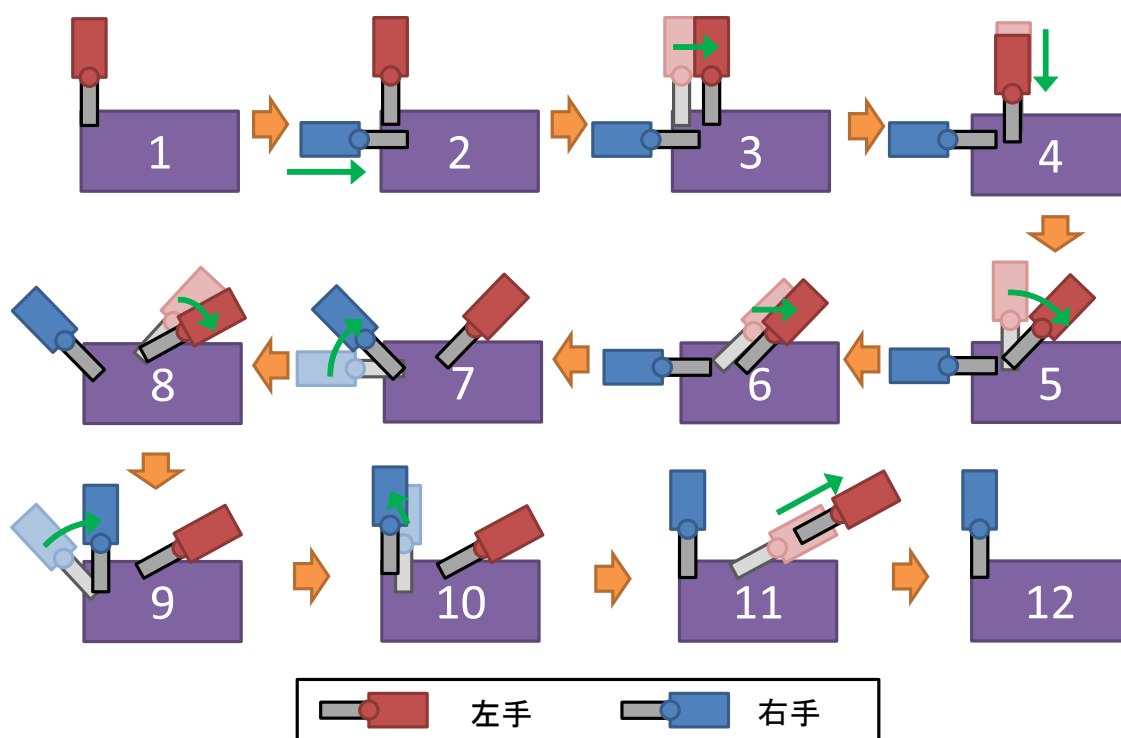
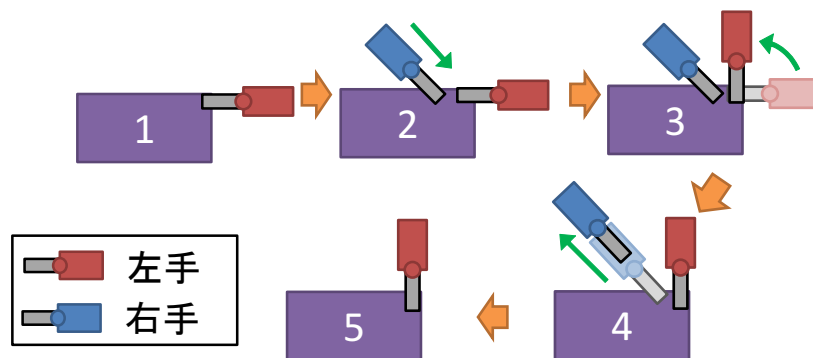


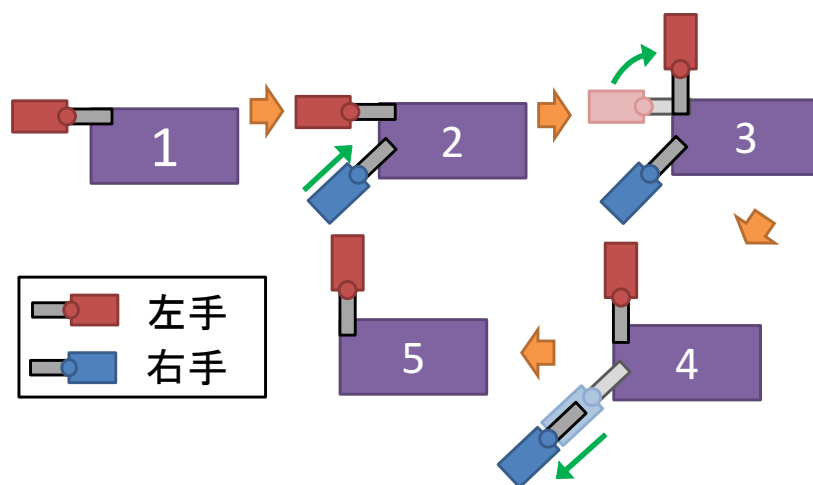
Fig. 4.7: 持ち替え操作

持ち直し操作

ここでは、本システムで用いた持ち直し操作について説明する。Fig. 4.8は持ち直し操作の手順の一例を示したものである。持ち直し操作は条件によって、布の初期把持角度・目標把持角度が変わる。基本的な動作は持ち替え操作と同じだが、空いている方のハンドで布を押さえている間に、元々、布を掴んでいたもう片方のハンドが一度、布を離す。ここで、この離れたハンドは把持姿勢を変えて再び、掴み直せばよいので、持ち替え操作より手順が少なくて済む。持ち直し操作の場合も、姿勢を変えたり移動しているハンドは完全には布から離れず、開いたグリップの間で布が垂れないように拘束しながら、移動していく。



(a)



(b)

Fig. 4.8: 持ち直し操作 (a) 例1 (b) 例2

持ち替え・持ち直し操作時の制約条件

Fig. 4.9 は、姿勢を変える方のハンドが回転する方向と、布を押さえるハンドの位置の関係を表したものである。回転方向によっては、重力の影響により、姿勢を変えている方のハンドから布がずれ落ちてしまう場合がある。そこで、布把持姿勢の初期位置と終了位置の回転方向、加えて押さえる方のハンド位置を考慮し、操作が実行できる場合かできない場合かを判断する。

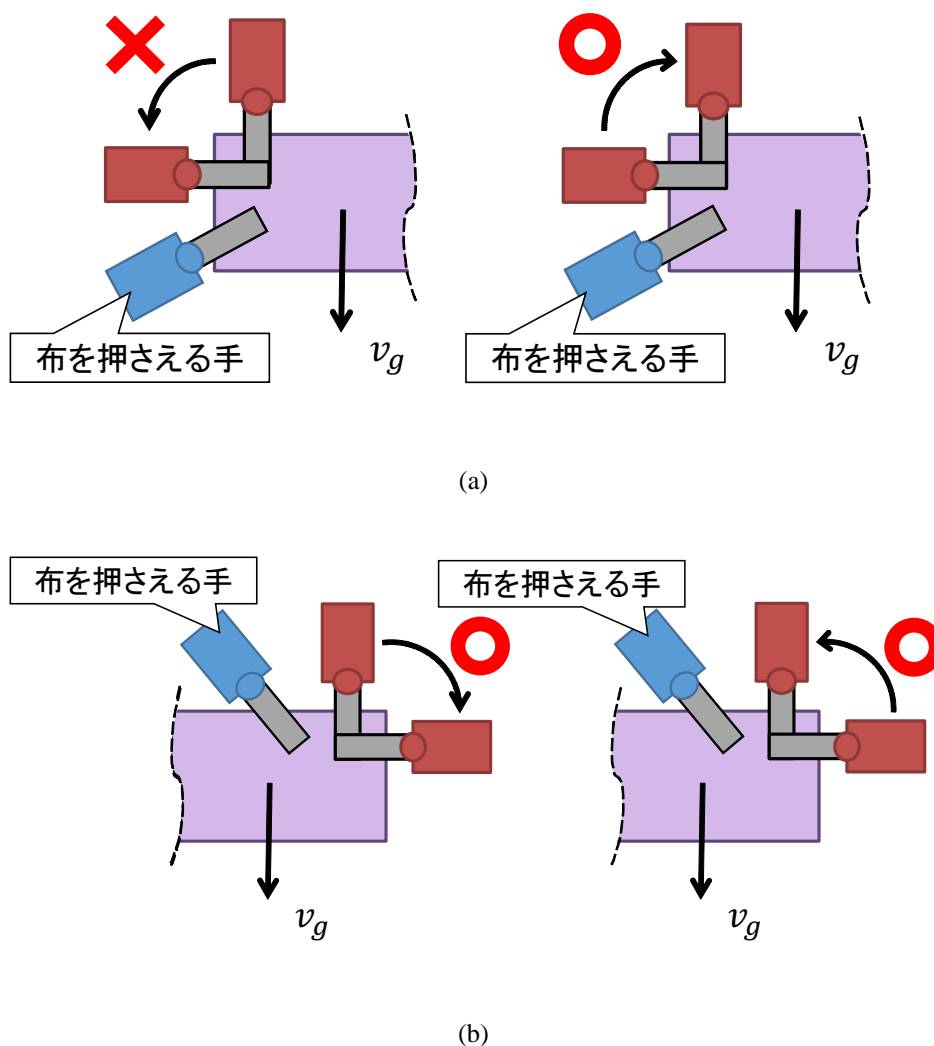


Fig. 4.9: 持ち替え・持ち直し操作時の制約条件 (a) 例 1 (b) 例 2

4.2.2 ロボットの動作計画手法

ここでは、被覆操作に適したロボット動作の計画手法について述べる。ある手先経路が与えられたとき、様々な把持姿勢への持ち替え・持ち直し操作・その操作の実行位置の組み合わせは無数に存在する。計画ごとに、布の把持姿勢や持ち替え位置が異なるため、4.2.1で述べたように、持ち替え・持ち直し操作の確実性が変わる。そのため、なるべく、成功しやすい場所で持ち替えと持ち直しを行うような組み合わせを選択したい。そこで本研究では、全ての布の把持姿勢、腕の数に合わせた手先経路を表すグラフを作成し、探索を行い最適な動作を計画する方針を取る。グラフを用いた動作計画の研究としては、物体をただ掴むのではなく、押したり、物体の頂点や辺で転がしたりして物体を移動させるグラスプレスマニピュレーション [103–110] が挙げられる。本研究の動作計画で用いるグラフには持ち替え・持ち直しを表すエッジがあり、持ち替え・持ち直し操作のしやすさ（確実性）を評価した重みが付けられている。これらの持ち替え・持ち直し操作は4.2.1で述べたように、一回の操作で様々な方向や位置に大きく両腕が動く。そのため、ある持ち替え・持ち直し操作の確実性と、その操作の全動作のIKが解けて実際に実行できる可能性は独立している。また、一回の持ち替え・持ち直しでもその動作数は多く、多くのIK計算コストが要求される。このように、被覆操作における動作計画では確実性の評価に加え、計算コストの掛かるIK判定を随時行わなければならないという新たな難しさがある。そこで、本研究では以下の2つの要素を合わせた動作計画を提案する。

- 操作の確実性を用いたグラフによる動作探索
- 動作のIK判定（IK計算を行い、その姿勢を取ることができるかの判定）

動作探索について

ここでは、本論文が提案する重み評価を用いたグラフベースの動作探索について述べる。本手法では、全ての布の把持姿勢、腕の数に合わせた手先経路を表すグラフを作成し、グラフ探索を行う。

まず、グラフを表現するための表記方法について述べる。グラフの頂点は $V(i,d,h)$ と表記し、各 i,d,h は以下のような情報を意味する。

- $i \in \{0, 1, \dots, N\}$: 手先経路の経由点数
- $d \in \{0, 1, \dots, D\}$: 布把持姿勢の角度
- $h \in \{0, 1, \dots, H\}$: 腕の数

ノード間を結ぶエッジは手先経路を進む動作、持ち替え操作、持ち直し操作の三種類がある。グラフのエッジはグラフの頂点 $V(i,d,h)$ と $V(i',d',h')$ を結ぶエッジの場合、 $E(V(i,d,h),V(i',d',h'))$ と表記し、各エッジの重みは以下のように表記する。

- 持ち替え操作エッジの重み: $W_{\text{inter}}(E(V(i,d,h),V(i',d',h')))$
- 持ち直し操作エッジの重み: $W_{\text{intra}}(E(V(i,d,h),V(i',d',h')))$
- 手先経路を進む動作エッジの重み: $W_{\text{forward}}(E(V(i,d,h),V(i',d',h')))$

まず、Fig. 4.10 に示すように、各経由点に到達できるかのみ IK の計算を行いノードを作成する。そして、Fig. 4.11 に示すように、IK の連続性を判定し、手先経路を進む動作エッジ E_{forward} を作成する。この E_{forward} では、手先経路を進む方向にしか進むことができない。次に、Fig. 4.12 に示すように、持ち替え・持ち直し操作を表す各エッジ $E_{\text{inter}}, E_{\text{intra}}$ を生成し、それぞれ、操作の確実性に基づいて重みを付ける。 $E_{\text{inter}}, E_{\text{intra}}$ は無向グラフであり、各エッジ方向ごとに初期姿勢・用いるハンドが変わるので、それぞれの操作ごとの重みを付ける。実際の重み付け方法については、次の 4.2.2 で詳しく説明する。

探索における初期位置および目標位置について、初期ノードは $i=0$ 、目標ノードは $i=N$ であり、かつ把持姿勢と把持する腕に関しては規定しないため、グラフ上では、それぞれ不

複数のノードに対応する。このため、Fig. 4.13 に示すように、これら $i=0$, $i=N$ のノードに接続された仮想的な初期ノードと目標ノードを作成する。

このようにして、生成されたグラフについて、最小重みの経路を探索する。本研究では今回のグラフ探索に、一般的なグラフ探索手法であるダイグストラ法を用いた。経路が見つかり、持ち替え又は持ち直し操作が使用される場合、実際にアームが動作可能か IK の計算をする。もし、不可能な場合はその部分のエッジを消し、可能な経路が見つかるまで再探索を行う。

実際のグラフの生成例として、円柱に 360° 布を巻く時の手先経路とグラフの結果を Fig. 4.14 に示す。Fig. 4.14 上部に、円柱のフィットラインと生成された手先経路、その経由点に到達可能かのアイコンを示す。腕の数 ($H=2$)、把持姿勢数 ($D=3$) の条件で、目標線から生成された手先経路の経由点 ($N=36$) 全てについて、IK が解けるか計算する。Fig. 4.14 下部のように、 $D=1,2$ の時は、到達できる手先経由点が少ないことがわかる。さらに経由点間の IK の連続性を判定し、これらの結果をまとめて、ノードグラフを作成した。

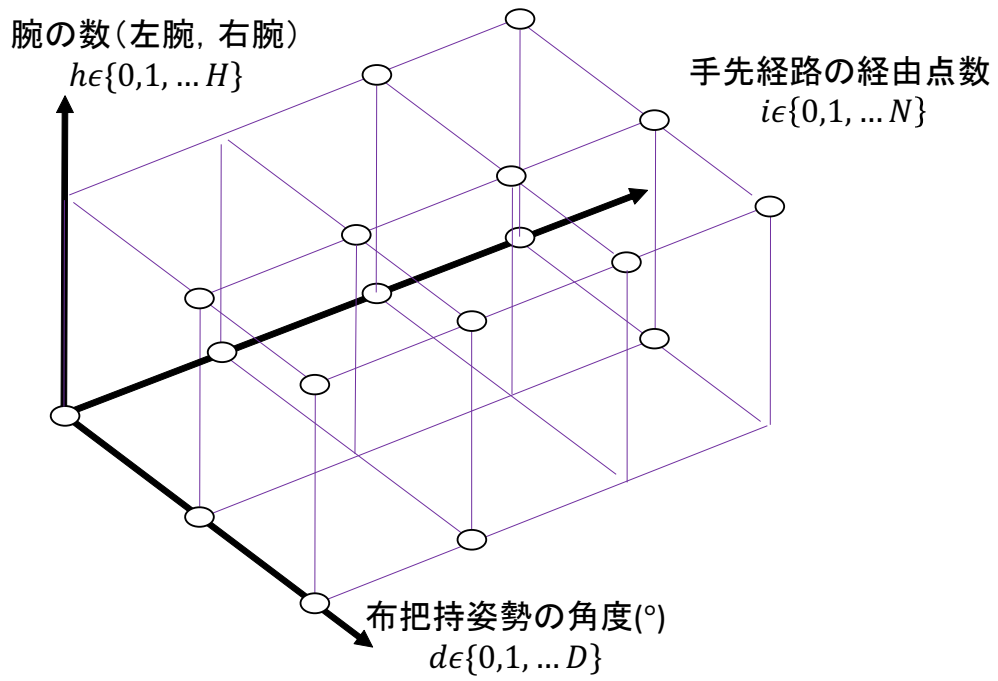


Fig. 4.10: グラフの頂点 V の生成

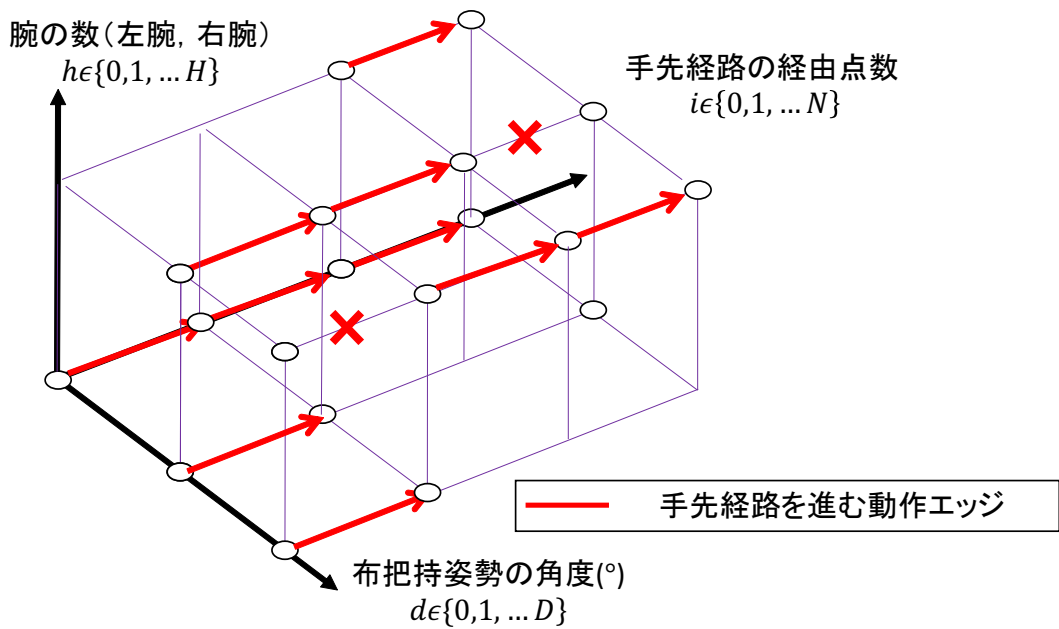


Fig. 4.11: 手先経路を進む動作エッジ E_{forward} の生成

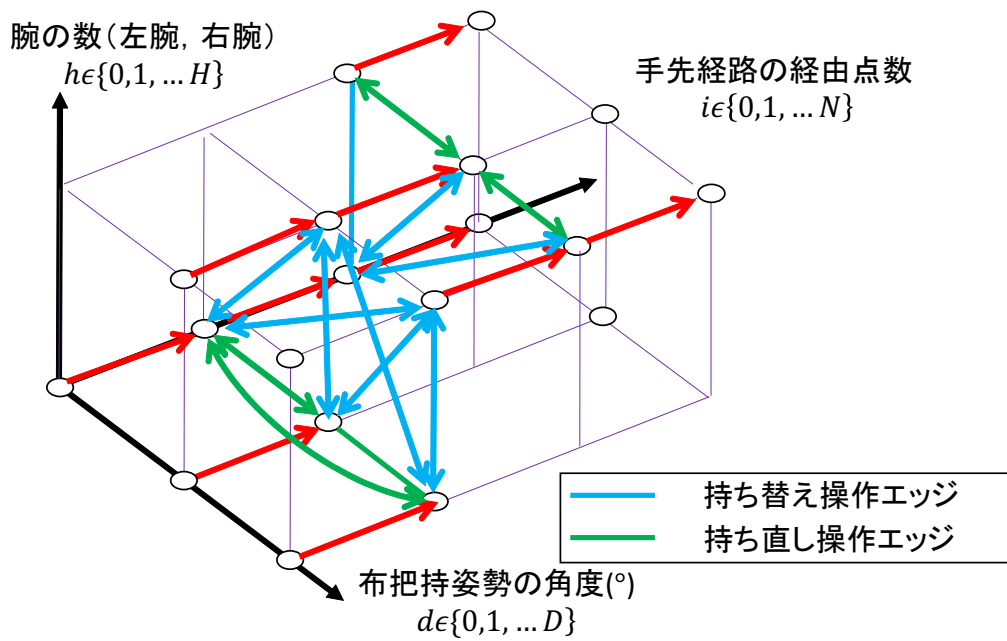


Fig. 4.12: 持ち替え操作エッジ E_{inter} と持ち直し操作エッジ E_{intra} の生成

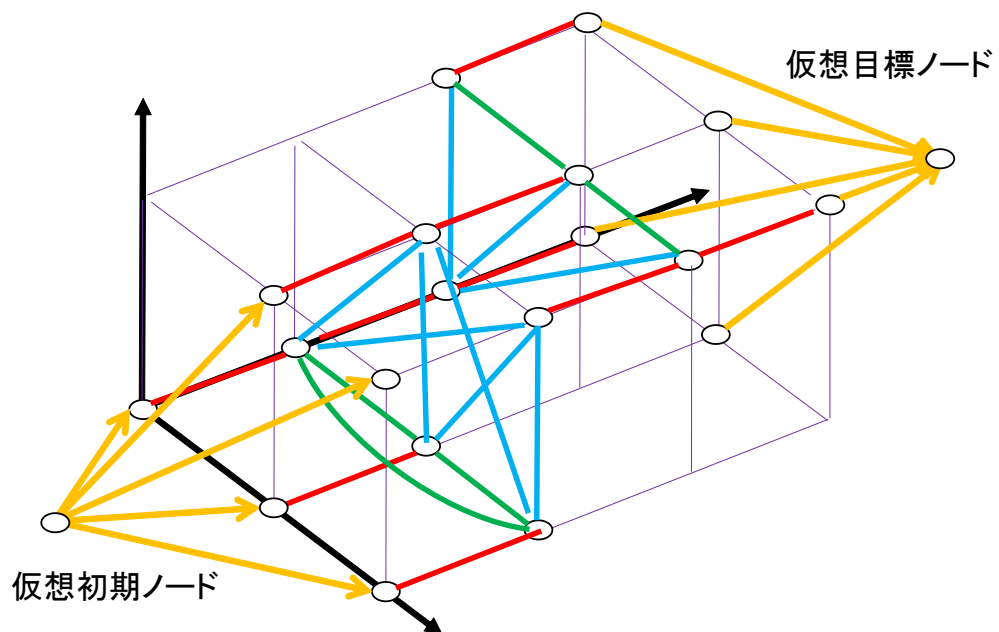


Fig. 4.13: 仮想初期ノードと仮想目標ノードの生成

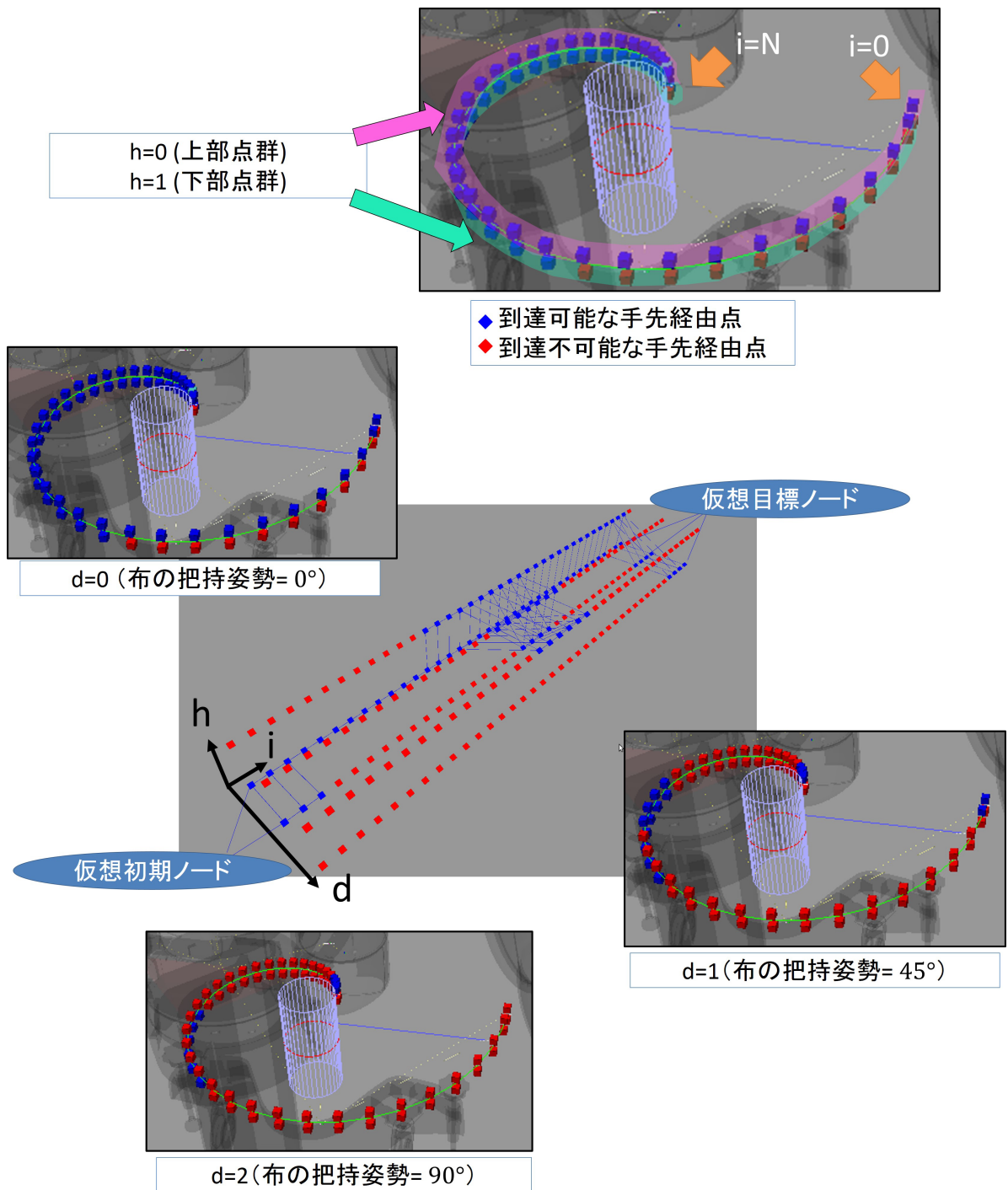


Fig. 4.14: 手先経路からのグラフ生成例

エッジの重み付け関数

各エッジの重みは以下の複数の重みづけ関数から決まる。

$$W_{\text{inter}} = k_{\text{inter}} \cdot W_{\text{pose}} \cdot W_{\text{gravity}} \cdot W_{\text{direction}} \quad (4.4)$$

$$W_{\text{intra}} = k_{\text{intra}} \cdot W_{\text{pose}} \cdot W_{\text{gravity}} \cdot W_{\text{direction}} \quad (4.5)$$

$$W_{\text{forward}} = k_{\text{forward}} \quad (4.6)$$

操作の確実性を決める各重み付け関数について、これらは使用するハンドの形状、持ち替え・持ち直し操作、アームの性能を考慮して設計される。それぞれの重みは $1 \sim M$ (M は1以上の任意の値)の範囲をとるように設計する。

- $W_{\text{pose}}(i, d, d')$: 持ち替え・持ち直し操作の行う時の把持姿勢の変化量: 重み $1 \sim M$
- $W_{\text{gravity}}(i)$: 布の姿勢と重力方向の影響: 重み $1 \sim M$
- $W_{\text{direction}}(i)$: 持ち替え・持ち直し操作の行う向きの影響: 重み $1 \sim M$

$k_{\text{inter}}, k_{\text{intra}}, k_{\text{forward}}$ は各重みを調整するための係数である。

$W_{\text{pose}}(i)$ は持ち替え・持ち直し操作の行う時の姿勢の開始時と終了時の把持姿勢の変化量を考慮した重みである。Fig. 4.15 に示すように、持ち替え・持ち直し操作の開始時と終了時の把持姿勢の差が大きいほど操作の難易度が上がる。

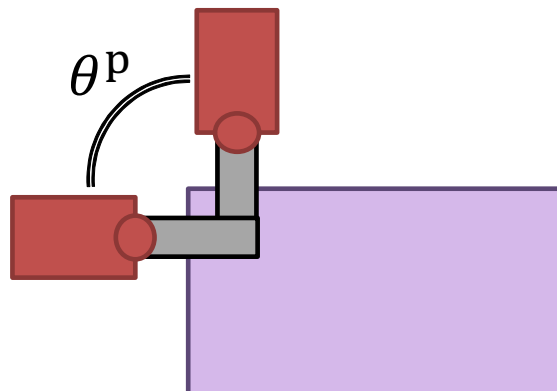


Fig. 4.15: 把持姿勢の変化量を評価する角度 θ^p

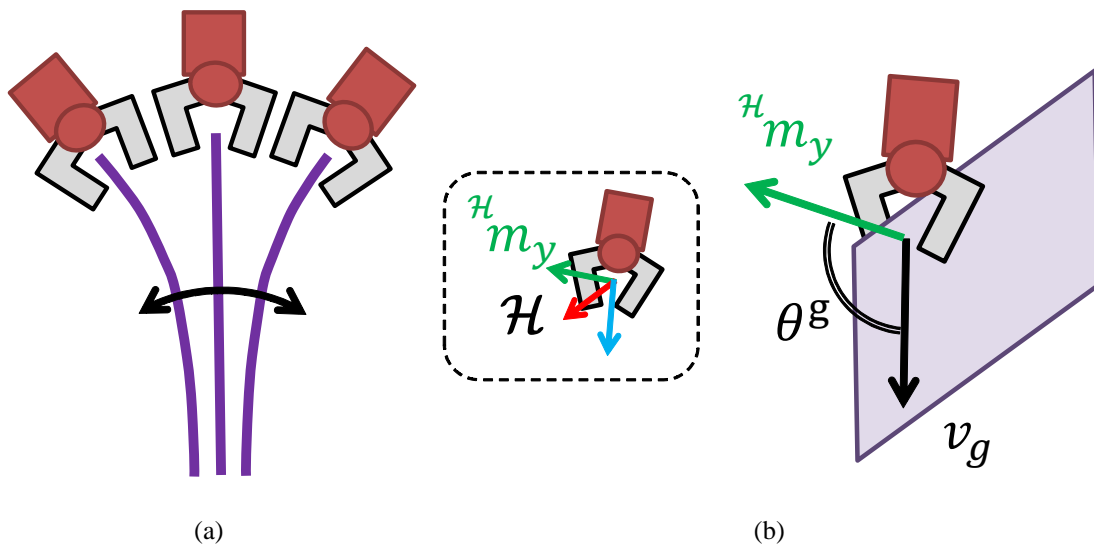


Fig. 4.16: 重力の影響を評価する角度 θ^g (a) ハンドの向きと布の弛み (b) θ^g の導出

そのため、把持姿勢の差が小さくなるような持ち替え・持ち直し操作を行いたい。そこで、開始時の把持姿勢と終了時の把持姿勢を比較し、重み評価を行う。開始時の把持姿勢角度 d と終了時の把持姿勢角度 d' の差を θ^p とする (式 (4.7))。

$$\theta^p = |d - d'| \quad (0^\circ \leq \theta^p \leq 90^\circ) \quad (4.7)$$

i 番目の手先経路座標系 \mathcal{H}_i の場合の角度 $\theta_{i,d,d'}^p$ を 1~M の範囲の重みになるように計算する (式 (4.8))。

$$W_{\text{pose}}(i, d, d') = \frac{(M-1)\theta_{i,d,d'}^p}{90} + 1 \quad (0^\circ \leq \theta^p \leq 90^\circ) \quad (4.8)$$

これにより、なるべく角度移動量が少ない持ち替え・持ち直し操作が行われるようにする。

$W_{\text{gravity}}(i)$ は重力の影響により布が弛むのを考慮した重みである。Fig. 4.16(a) に示すように、把持姿勢と布の平面の位置関係は重力方向によって変わってしまう。それにより、ハンドのグリップ面と布の面の向きが離れるほど、持ち替え・持ち直し操作の難易度が上がる。そのため、ハンドのグリップ面と布の面の向きが近い時に持ち替え・持ち直し操作を行いたい。そこで、持ち替え・持ち直し操作時の布を持つハンド姿勢と重力方向を比較し、重み評価を行う。Fig. 4.16(b) に示すように、グリップ平面の垂線ベクトルを m_y 、重力方向のベク

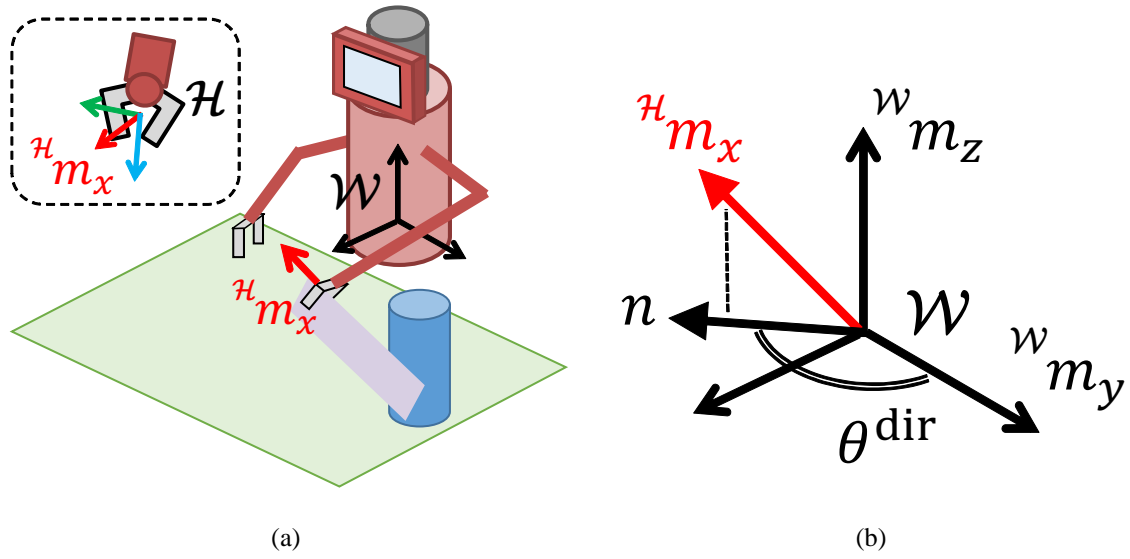


Fig. 4.17: ハンドとロボットの向きの影響を評価する角度 θ^{dir} (a) ハンドとロボットの向きの関係 (b) θ^{dir} の導出

トルを v_g とし、そのベクトルどうしの成す角度 θ^g を 1~9 の範囲の重みになるように計算する (式 (4.9)) .

$$\theta^g = \left| \left(\cos^{-1} \frac{m_y \cdot v_g}{\|m_y\| \|v_g\|} \right) - 90 \right| \quad (0^\circ \leq \theta^g \leq 90^\circ) \quad (4.9)$$

i 番目の手先経路座標系 \mathcal{H}_i の場合の角度 θ_i^g を式 (4.10) のように重みに計算する.

$$W_{\text{gravity}}(i) = \frac{(M-1)\theta_i^g}{90} + 1 \quad (4.10)$$

これにより、なるべくハンドのグリッパ面と布の面の向きがなるべく近くなるような位置で、持ち替え・持ち直し操作が行われるようにする.

$W_{\text{direction}}(i)$ は持ち替え・持ち直し操作の行う向きの影響を考慮した重みである. Fig. 4.17(a) に示すように、持ち替え・持ち直し操作を行う時のハンドの姿勢とロボットの姿勢の位置関係によって操作の難易度が上がる. そのため、ロボットの向きに正対するような方向で持ち替え・持ち直し操作を行いたい. そこで、持ち替え・持ち直し操作を行う時のハンドの姿勢とロボットの姿勢を比較し、重み評価を行う. Fig. 4.17(b) に示すように、ハンド姿勢 \mathcal{H} 、ロ

ロボット姿勢 \mathcal{W} を用いて、式 (4.11) のように姿勢の差を表す角度 θ^{dir} を計算する.

$$\theta_i^{\text{dir}} = \left| \left(\left| \cos^{-1} \frac{n \cdot {}^{\mathcal{W}}m_y}{\|n\| \|{}^{\mathcal{W}}m_y\|} \right| - 90 \right) \right| \quad (0^\circ \leq \theta^{\text{dir}} \leq 90^\circ) \quad (4.11)$$

ただし, $n = {}^{\mathcal{W}}m_z \times ({}^{\mathcal{H}_i}m_x \times {}^{\mathcal{W}}m_z)$ とする. i 番目の手先経路座標系 \mathcal{H}_i の位置の場合の角度 θ_i^{dir} を 1~9 の範囲の重みになるように重みに計算する (式 (4.12)). これにより, なるべくロボットの正面付近で持ち替え・持ち直し操作が行われるようにする.

$$W_{\text{direction}}(i) = \frac{(M-1)(90 - \theta_i^{\text{dir}})}{90} + 1 \quad (4.12)$$

重みの設定

本研究では、動作探索において、なるべく動作全体の成功率が高くなるような計画をしたい。持ち替え操作の方が、動作数が多いため成功率が下がりやすい。そのため、探索中に持ち替え操作の重み W_{inter} と持ち直し操作の重み W_{intra} が同じだった場合は、持ち替え操作よりは持ち直し操作が選択される方が望ましい。そこで、本手法では各重み係数 k を用いて、持ち替え操作は持ち直し操作より、持ち直し操作は手先経路を進む動作より十分大きな重みとなるように調整する。これにより、3種類のエッジの重みの範囲は以下となる。

- $k_{\text{inter}} \leq W_{\text{inter}} = k_{\text{inter}} \cdot W_{\text{pose}} \cdot W_{\text{gravity}} \cdot W_{\text{forward}} \leq k_{\text{inter}} \cdot M^3$
- $k_{\text{intra}} \leq W_{\text{intra}} = k_{\text{intra}} \cdot W_{\text{pose}} \cdot W_{\text{gravity}} \cdot W_{\text{forward}} \leq k_{\text{intra}} \cdot M^3$
- $W_{\text{forward}} = k_{\text{forward}}$

これにより、 $W_{\text{inter}} > W_{\text{intra}} > W_{\text{forward}}$ の関係を持った重みがつけられる。本手法では、それぞれの重みは操作の確実性を表しているものとし、経路の総重みが意味するものは、作業全体での確実性を意味するものである。そのため、探索アルゴリズムで経路の重みを計算する時は一般的なグラフ探索手法のように、各エッジの重みを足し合わせていくのではなく、式(4.13)のように計算をする。これにより、総重みは各ノードへの確実性を表す重みを掛け合わせたものとなり、経路全体の確実性の期待値を意味するものとなる。

$$C_{\text{all}} = \sum_{j=0}^N \log W_j = \log \sum_{j=0}^N W_j \quad (C_{\text{all}} : \text{経路の重み}, W_j : \text{エッジの重み}) \quad (4.13)$$

動作の IK 判定

生成したグラフの各ノード，エッジの取りうるロボットの動作について，実際にその動作が実行可能か IK 計算を行う必要がある．計画中，その IK 計算をいつ，どのように行うべきか述べる．グラフ生成後，経路探索前にすべての取りうる動作について IK 計算を行うとすると，膨大な計算量が必要となる．

実際に，具体的なグラフ中の各動作ごとの総 IK 計算量について述べる．全ての E_{inter} に必要な計算量 C_{inter} は式 (4.14)，全ての E_{intra} に必要な計算量 C_{intra} は式 (4.15)，全ての $E_{forward}$ に必要な計算量 $C_{forward}$ は式 (4.16) となる．ただし， c_{inter} は持ち替え操作 1 回に必要な計算量， c_{intra} は持ち直し操作 1 回に必要な計算量， $c_{forward}$ は手先を進む動作 1 回に必要な計算量である．

$$C_{inter} = N_{HP} 2(2DD) c_{inter} \quad (4.14)$$

$$C_{intra} = NH(DP 2) c_{intra} \quad (4.15)$$

$$C_{forward} = NHD c_{forward} \quad (4.16)$$

式 (4.14,4.15,4.16) を比較すると，各経由点に手先が到達できるかの IK 計算量と比較すると，持ち替え・持ち直しの IK 計算が全計算量の大部分を占めている（今回，1 回の持ち替えで必要な逆運動学の計算量 c_{inter} は約 100 回．持ち直し c_{intra} はその半分ほどになり，各操作の IK 計算量の中では，特にハンドの姿勢を変える動作の部分に計算量が必要となっている）．そのため，全ての持ち替え・持ち直しエッジ IK 計算を行わないようにし，少ない IK 計算量で経路を探索する必要がある．そこで，本探索手法では，グラフ生成時には各経由点に手先が到達できるかの IK 計算のみを行い，持ち替え・持ち直しについては，グラフ探索後に実際に選ばれた計画に必要な持ち替え・持ち直しエッジの IK 計算を行うことにする．これにより，すべての動作の IK を事前に計算してしまう場合と比べて，提案手法は IK の計算量を大幅に減らせることが期待できる．Fig. 4.18 に，実際に本研究が用いる探索アルゴリズムのグラフ生成から各 IK 計算・動作選択までのフローチャートを示す．

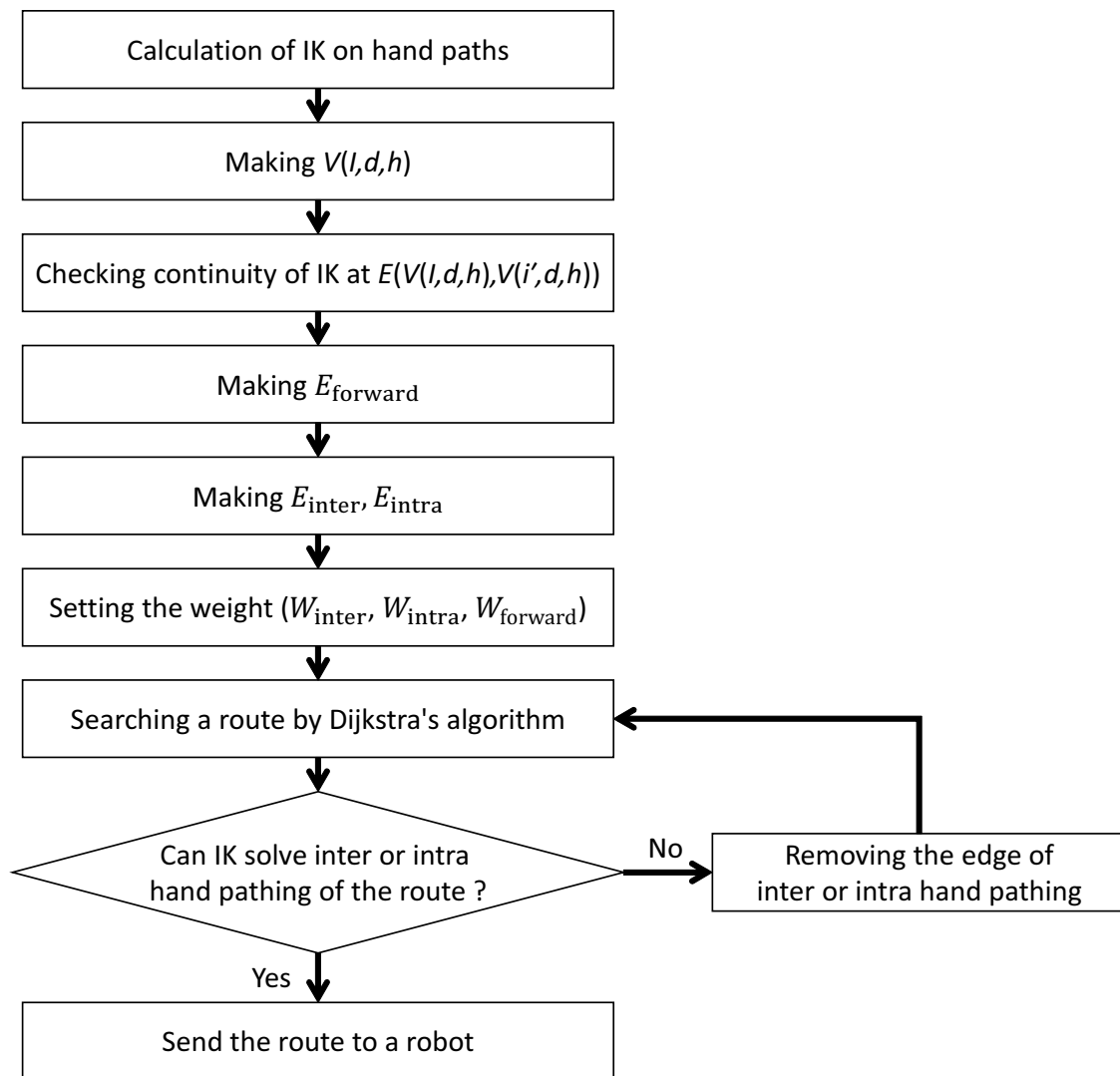


Fig. 4.18: 経路探索のアルゴリズム

4.3 実験

4.3.1 ソフトウェア構成

本システムは第2章で述べた被覆作業の3階層モデル化に基づき、各機能がROSのモジュール群として実装されている。Fig. 4.19に各レベルのモジュール群と各章の対応関係を示す。インストラクションレベルでは、教示デバイスによるオペレータの教示データから、第3.1節で述べた目標線生成方法を用いて、目標線を生成している。ハンドリングレベルでは、この目標線から、第4.1節で述べる手先経路生成方法を用いて、手先経路を生成している。ロボットレベルでは、この手先経路から、逆運動学計算モジュール等を用いて、最終的なロボットの関節動作計画を生成している。このように、教示デバイスによるオペレータの教示データが階層モデルを経て、最終的なロボットの関節動作計画に変換され、これをロボットに送ることにより、ロボットが被覆作業を行うことができる。

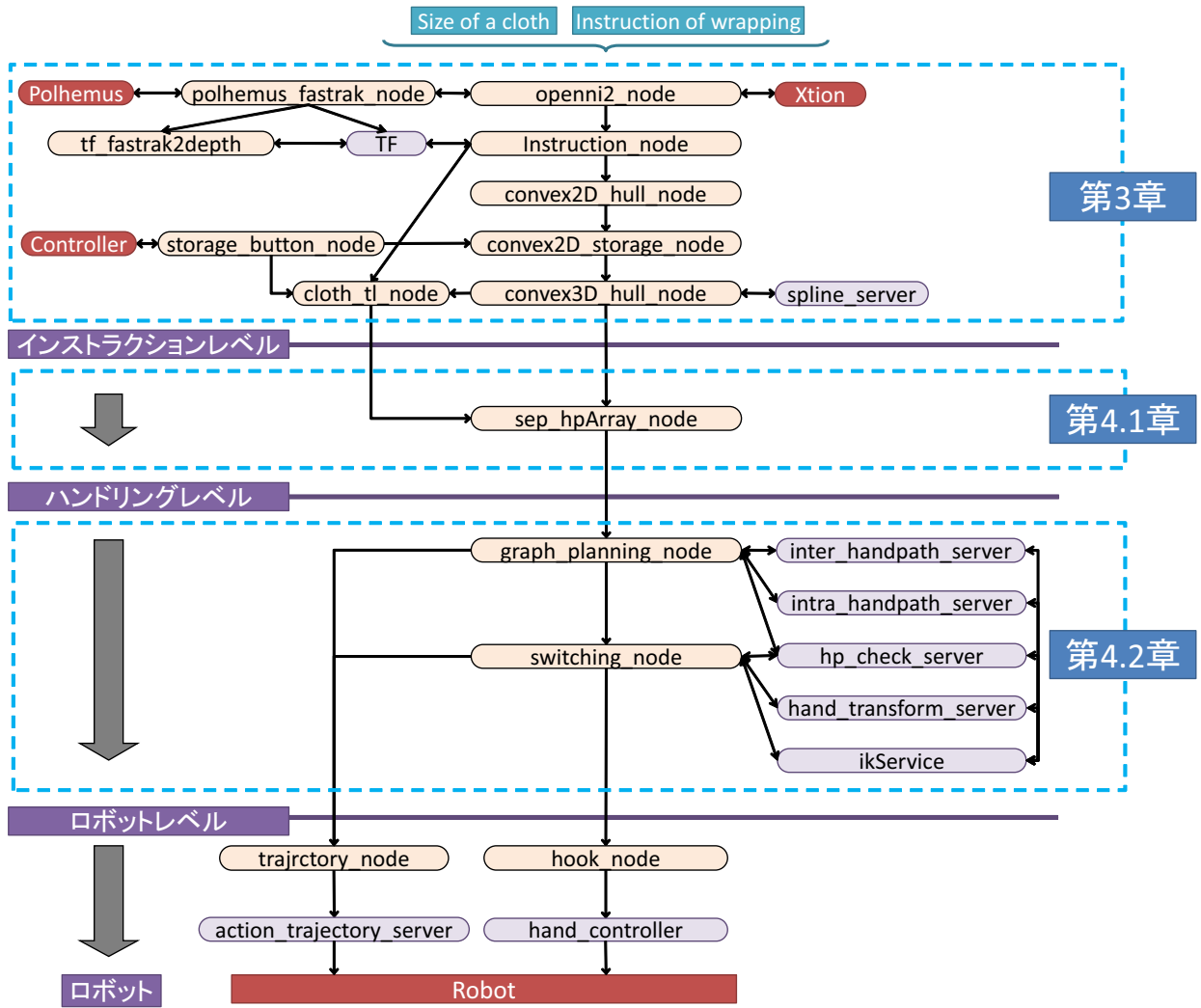


Fig. 4.19: ソフトウェア構成

4.3.2 実験環境

実験には、Fig. 4.20 に示す双腕ロボット（Rethink 製 Baxter）を使用し、被覆に用いる布は綿製のさらし布を用いた。Baxter は片腕 7 自由度を有する双腕アームロボットであり、手先には研究室で作成した二指ハンドが取り付けられている（Fig. 4.21）。このハンドは、株式会社 ROBOTIS 製のサーボモータ “Dynamixel MX-106R” を使用して作成されている。指 1 の軸が固定されており、開閉する際には指 2 のみが動き物体を把持する設計になっている。今回、アームの関節速度は安全のために、 $0.1(\text{rad/s})$ とした。また、各指の閉じた内側の部分には布を把持しやすいように滑り止めを取り付けた。ロボットの前には作業用の机を配置している。Fig. 4.22 のように木製の机の上に厚さ 4 cm のスポンジを置き、さらにその上より黒い布を配置している。

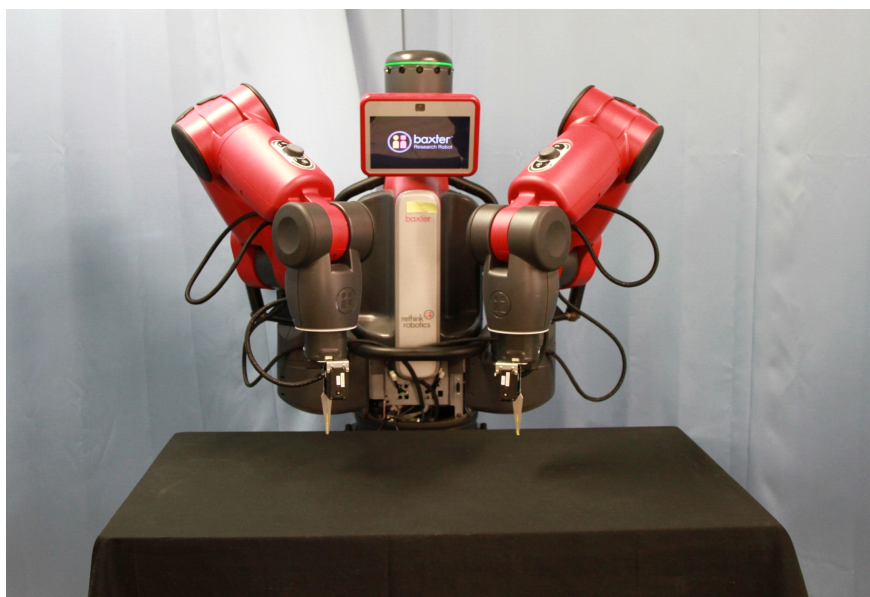


Fig. 4.20: Baxter



Fig. 4.21: 二指ハンド

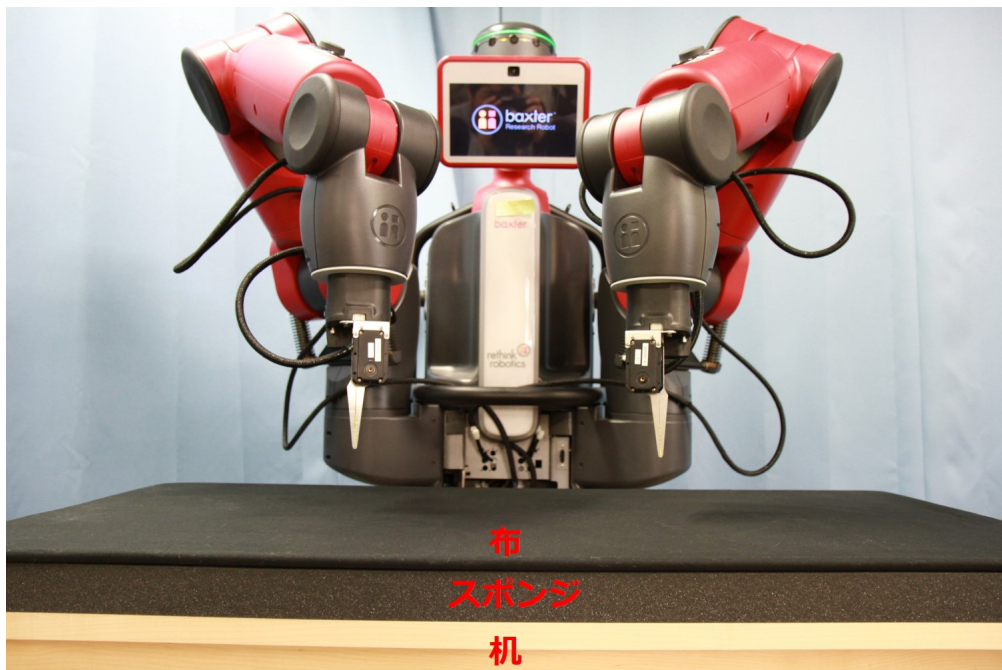


Fig. 4.22: 机

4.3.3 目標線を用いた被覆

初めに、手先経路生成手法を用いて、曲面形状に布を巻き付ける実験を行った。被包装物として、4.3.3では円柱（直径 20 cm，高さ 40 cm），4.3.3では円柱（直径 15 cm，高さ 40 cm）を使用した。ここで用いた目標線は、入力した円柱サイズに合わせて目標線を出力するプログラムにより、作成したものである。実験では、システムに目標線、布座標系、布の外形、布の把持位置が与えられる。

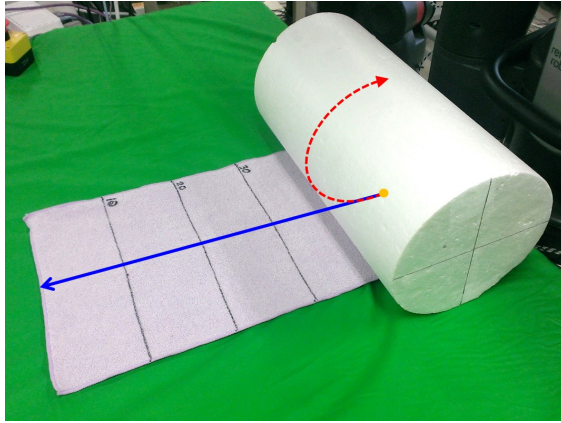
円柱（横向き）への巻き付け

横向きに設置した円柱に布の巻きつけ操作を行った。Fig. 4.23 に示すように、目標線は円柱の円周 150° 分を巻くように作成した。布と物体の初期配置として、円柱の巻付け開始位置から 38.3 cm 離れた位置に布の端が来るように布と物体を設置し、ロボットが両手で布の角を持つように予め設定した。これらの目標線と布の外形、指定された布の把持点から手先経路を生成した。結果として、Fig. 4.24 に示すように円柱へ布を巻きつけることができた。

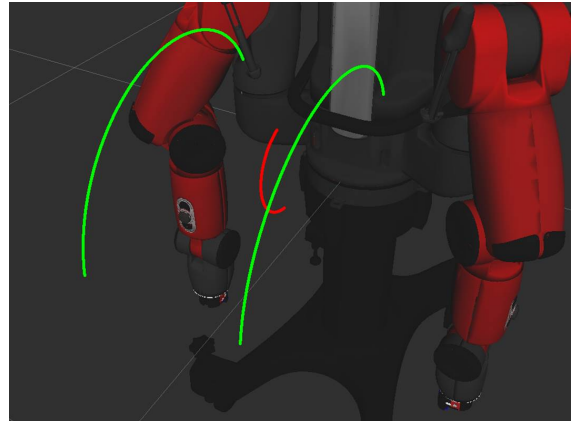
円柱（縦向き）への巻き付け

縦向きに設置した円柱に布の巻きつけ操作を行った。はじめに、円柱の円周 180° 分に水平に布を巻く目標線を作成した。この時の、布の長さを 40 cm とした (Fig. 4.25)。次に、円柱の円周 270° 分に斜めに布を巻く目標線を作成した。この時の、布の長さを 60 cm とした (Fig. 4.26)。この実験の時、ロボットは片手で布を把持するように設定した。

結果として、Fig. 4.27, 4.28 に示すように、円柱に巻きつけることができた。水平巻きの布に関しては、巻いている途中で弛んでしまい、布と物体上の目標線の重なりが最大 13 mm ずれていた。この問題については、布の状態をフィードバックしながら目標の位置に布を修正する必要がある。



(a)

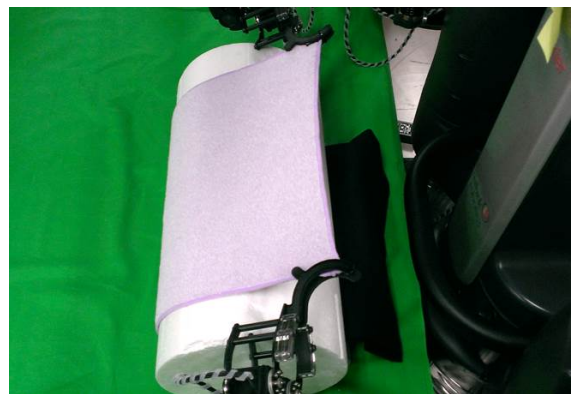


(b)

Fig. 4.23: (a) 水平に置かれた円柱（縦向き巻き付け） (b) 作成した目標線と生成された手先経路

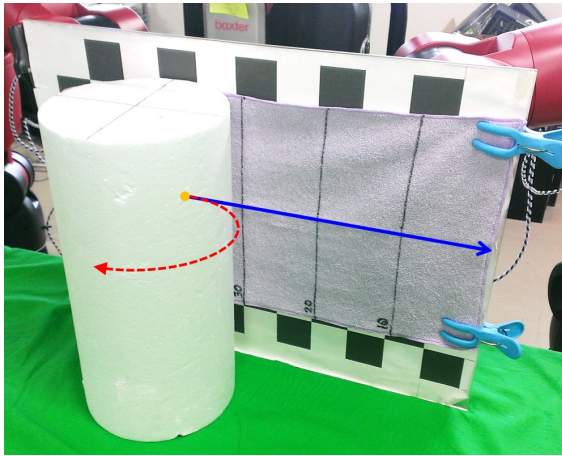


(a)

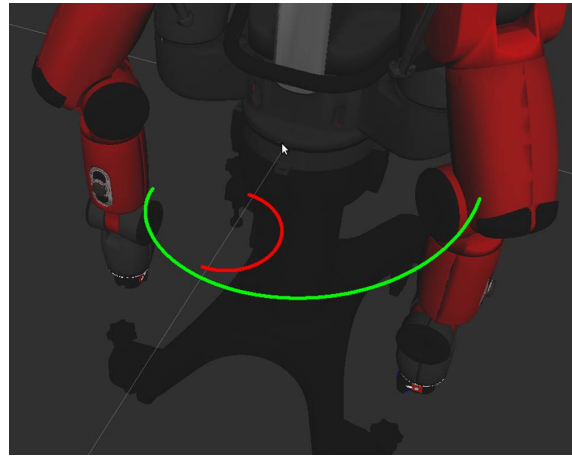


(b)

Fig. 4.24: 縦向き巻き付けの結果 (a) 正面 (b) 横

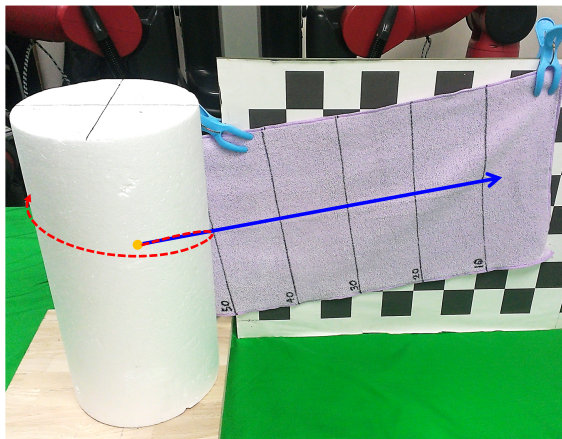


(a)

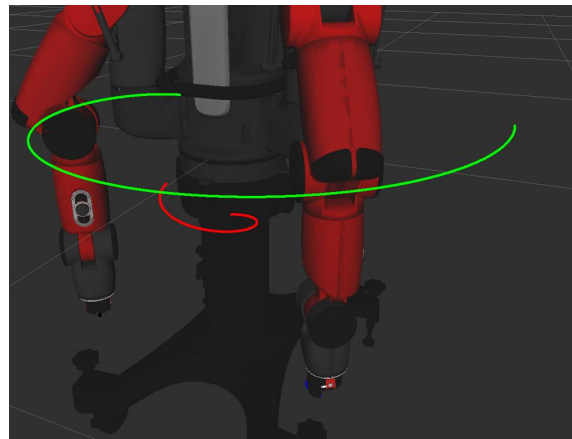


(b)

Fig. 4.25: (a) 縦に置かれた円柱（横向き巻き付け） (b) 作成した目標線と生成された手先経路



(a)



(b)

Fig. 4.26: (a) 縦に置かれた円柱（斜め向き巻き付け） (b) 作成した目標線と生成された手先経路

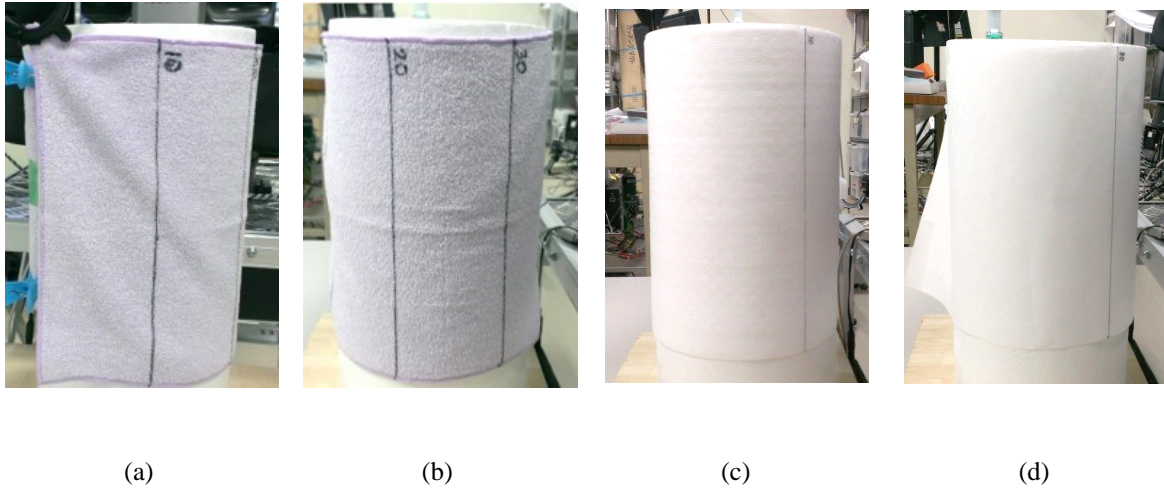


Fig. 4.27: 横向き巻き付けの結果 (a) タオル (巻き付けの終わり部分) (b) タオル (巻き付けの途中部分) (c) テーブルクロス (d) 紙

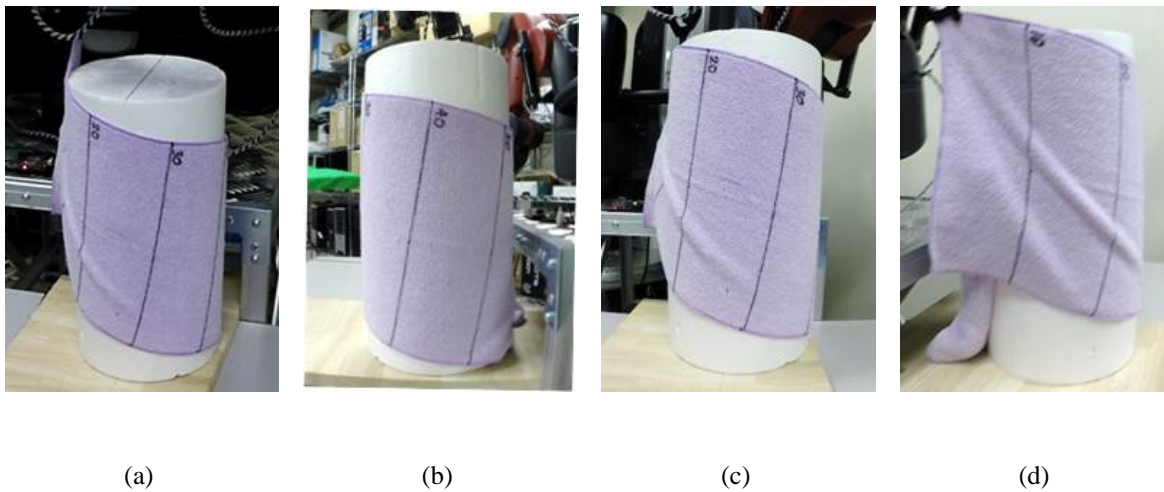
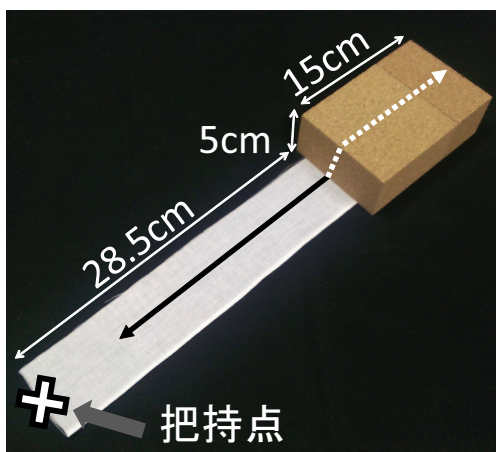


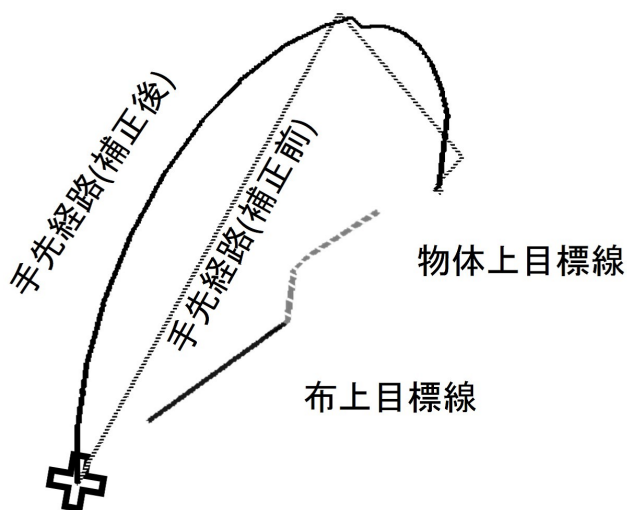
Fig. 4.28: 斜め向き巻き付けの結果 (a) 全体図 (b) 巻き付けの開始部分 (c) 巻き付けの途中部分 (d) 巻き付けの終わり部分

補正目標線を用いた手先経路の生成

本実験では, Fig. 4.29(a) のような箱の角に目標線を教示デバイスで入力し, 4.1.2 で述べた手先経路補正閾値を $\theta_{i,i+1}^x > 60^\circ$ と設定し, 手先経路を生成した時の例を示す. Fig. 4.29(b) のように, 目標線, 手先経路補正を行わず生成した手先経路に比べ, 補正後の手先経路は角を経由する部分も滑らかな円弧状に補間されていることがわかる.



(a)



(b)

Fig. 4.29: 手先経路の補正結果 (a) 対象物体 (b) 比較結果

4.3.4 凹凸を含む曲面形状への被覆

この実験では、3.4.6で行った、凹凸を含む曲面形状への教示デバイスを用いた指示実験で作成した目標線を用いて、手先経路を生成し、実際に被覆する実験を行った。まず、幅の狭い布を用いた場合 (Fig. 4.30(a)) の目標線ペア、その目標線ペアと把持点から生成した手先経路を Fig. 4.30(b) に示す。被覆した結果を Fig. 4.30(c) に示す。次に、幅の広い布を用いた場合 (Fig. 4.31(a)) の目標線ペア、その目標線ペアと把持点から生成した手先経路を Fig. 4.31(b) に示す。被覆した結果を Fig. 4.31(c) に示す。このように物体の考慮すべき凹部分のみを埋めた目標線から手先経路を生成し、実際に布で包むことができた。

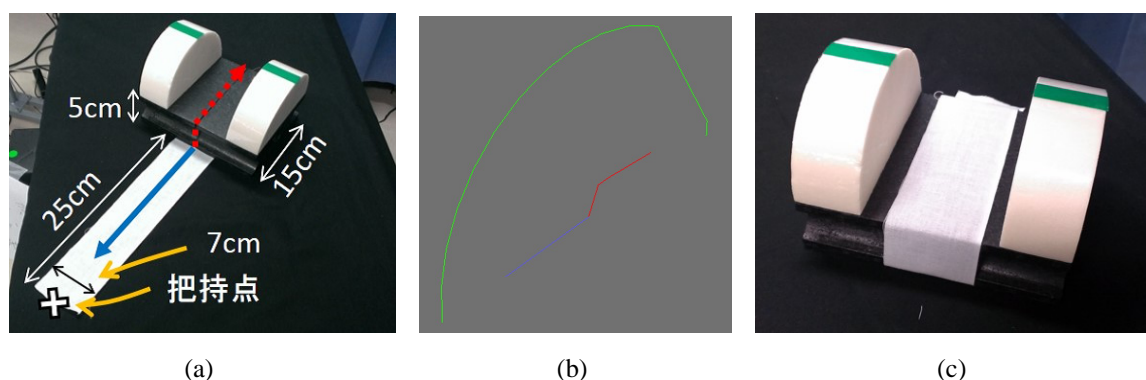


Fig. 4.30: 幅の狭い布による被覆 (a) 実験条件 (b) 目標線と手先経路 (c) 被覆結果

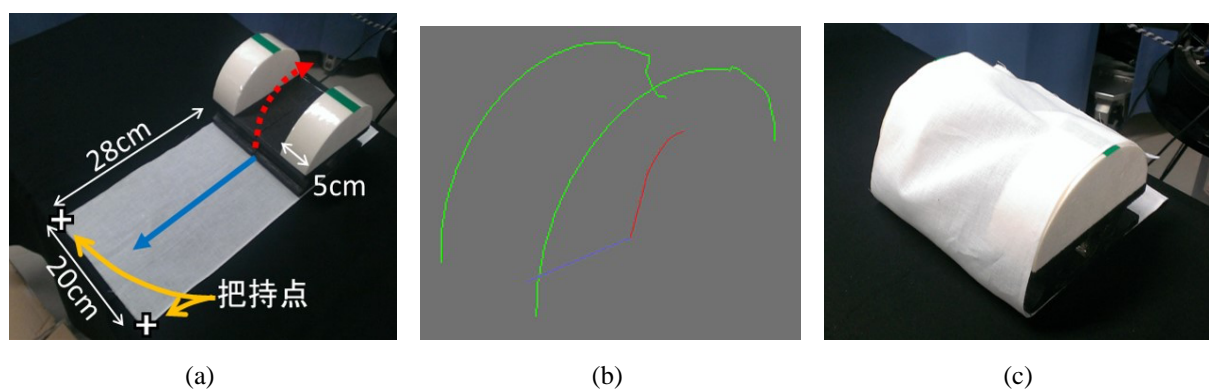


Fig. 4.31: 幅の広い布による被覆 (a) 実験条件 (b) 目標線と手先経路 (c) 被覆結果

4.3.5 複数の目標線を用いた被覆

この実験では、複数の目標線を用いた被覆の例として、平包み (Fig. 2.1(b)) を実行した。平包みの実行には Fig. 4.32(a) のような目標線が引かれる必要がある。そこで、箱へ4本の目標線をデバイスで入力したところ、Fig. 4.32(b) に示す手先経路が生成された。提案した手先経路生成方法は、例えば長方形の布の中心を通るような、布の辺に平行な布上目標線のみでなく、布の対角線上に布上目標線が引かれているような場合でも、手先経路を生成することができる。これを用いて、ロボットは Fig. 4.32 (c~e) に示すように箱を包んでいく。そして、結果として Fig. 4.32(f) に示すように、箱を平包みという被覆作業に成功した。

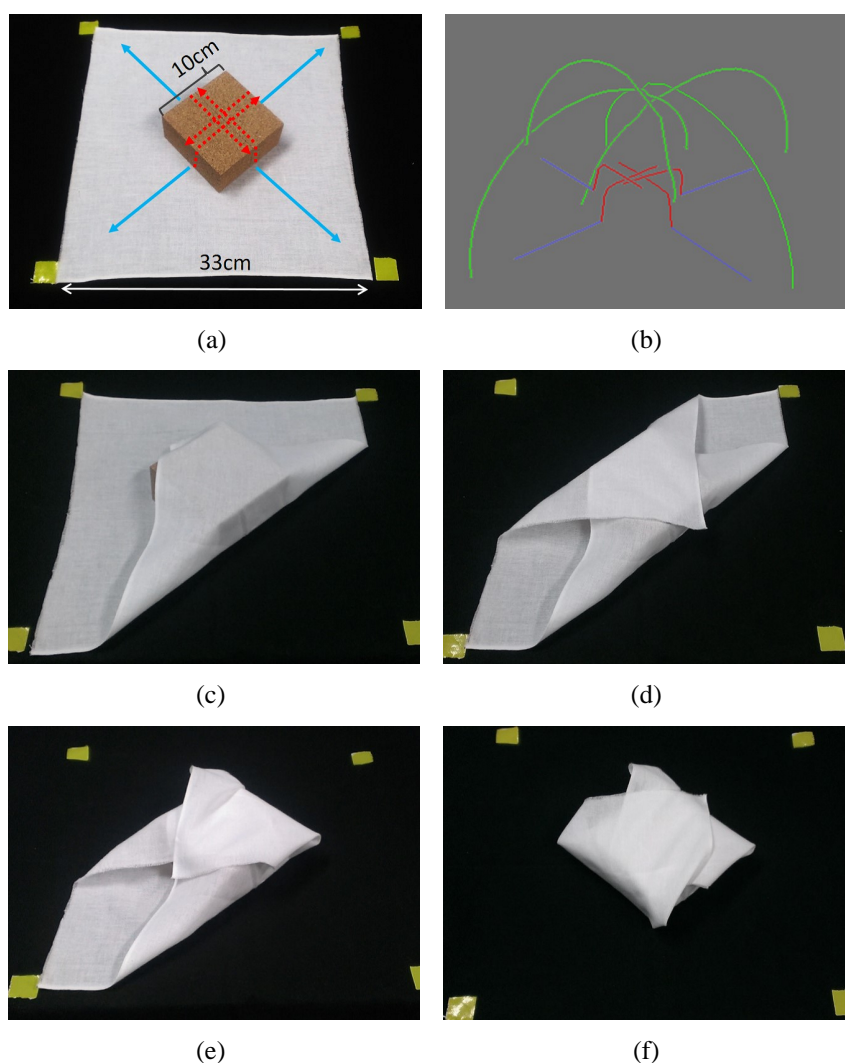


Fig. 4.32: 箱への平包み (a) 包み方 (b) 目標線 (c) 1 操作目 (d) 2 操作目 (e) 3 操作目 (f) 結果

4.3.6 持ち替え・持ち直し操作

この実験では、本論文で用いる持ち替え・持ち直し動作による布の操りを行った。布は円柱に巻き付けている途中の状態を想定し、固定している。今回扱う布の角は 90° であり、それに合わせて作成した持ち替え・持ち直し操作を用いている。

持ち替え操作

ここでは、持ち替え操作の一例として、左手から右手への持ち替え実験を行った。その前後で、布の把持姿勢が変わらないようにした。布がハンドから垂れたり落ちたりしないように、押さえながら少しずつ持ち替え動作を行っている。結果として、Fig. 4.33 に示すように、布の持ち替え操作を行うことができた。

持ち直し操作

ここでは、持ち直し操作の一例として、左手の布の把持姿勢を 45° 変更する持ち直し実験を行った。布がハンドから垂れたり落ちたりしないように、右手が姿勢変更中の左手に干渉しない位置で布を押さえ、持ち直し動作を行っている。結果として、Fig. 4.34 に示すように、布の持ち直し操作を行うことができた。

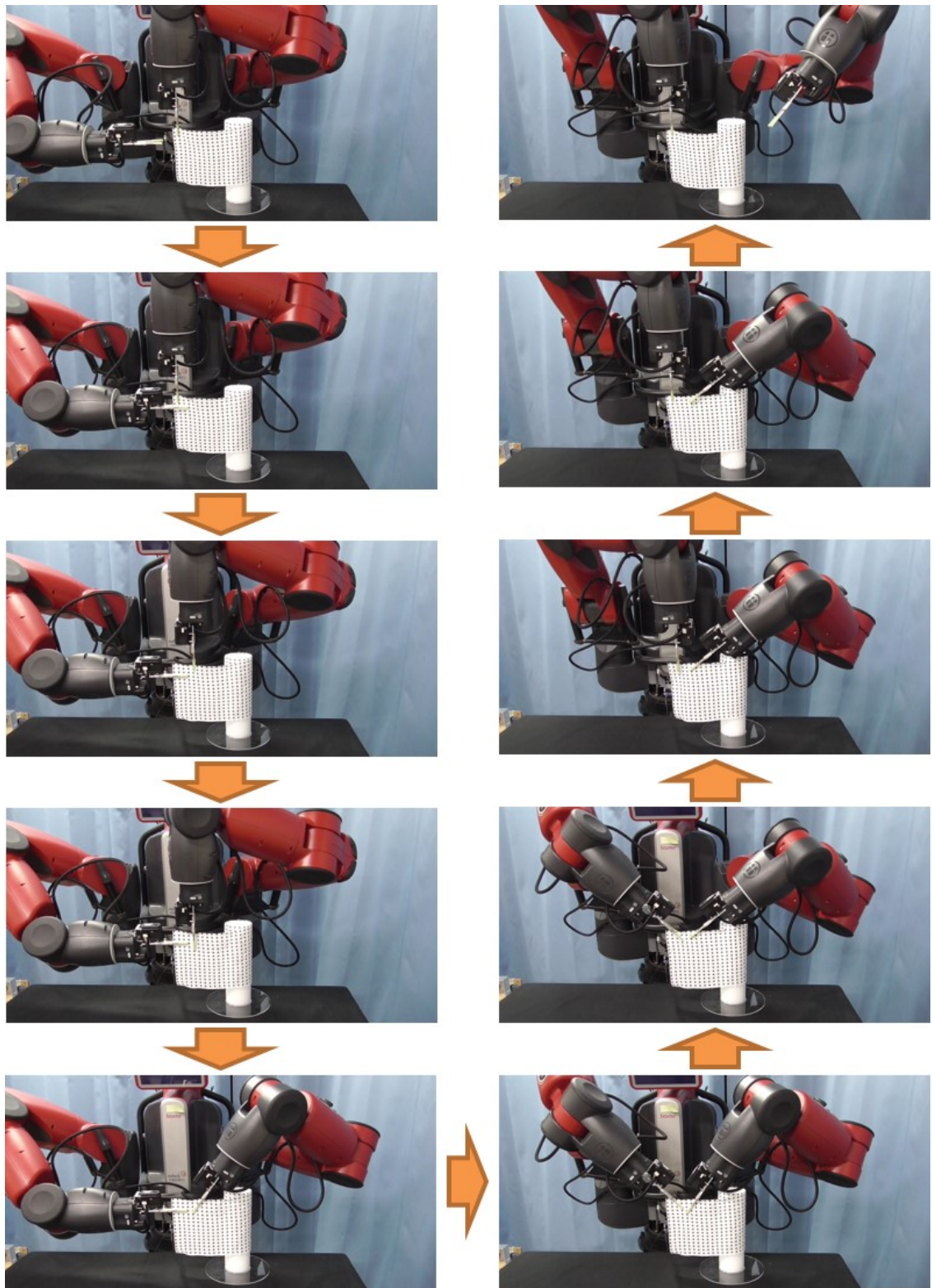


Fig. 4.33: 持ち替え操作の結果

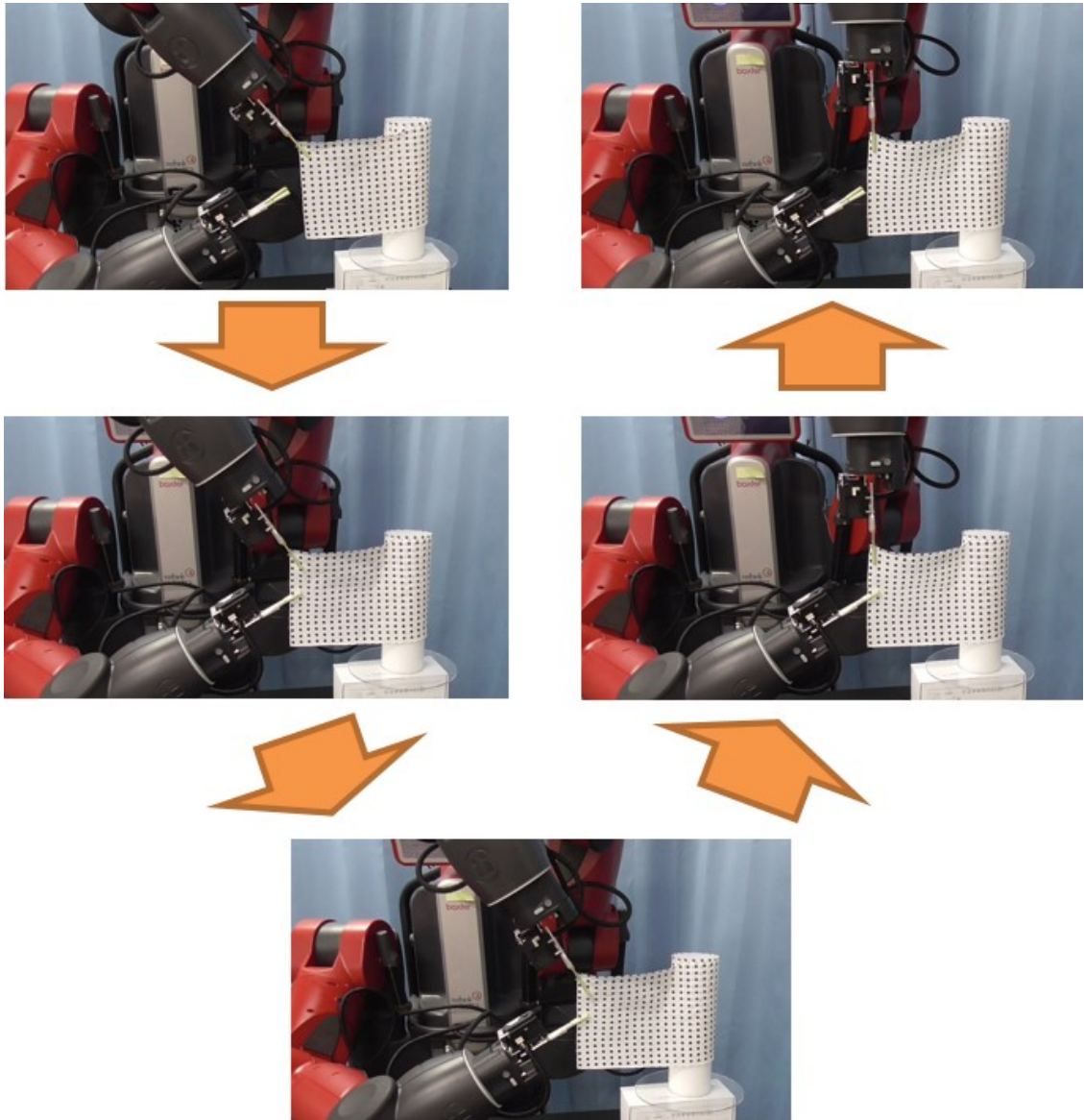


Fig. 4.34: 持ち直し操作の結果

4.3.7 L字管への巻き付け操作

Fig. 4.35(a) に示す直径 5 cm の L 字管に幅 7 cm の布を巻き付ける実験を行った。今回、Fig. 4.35(b) に示すように、布を巻き付けるための目標線をプログラムで作成し手先経路を生成し、ロボットに対しての L 字管の向きを Fig. 4.36 に示すように、2 パターン設定した。各重み付け関数については、 $1.0 \leq W_{\text{pose,gravity,forward}} \leq 9.0$ となるように設定し、各重み係数 k については $k_{\text{forward}} = 1$, $k_{\text{intra}} = 10$, $k_{\text{inter}} = 10000$ と設定した。今回扱う布の角は 90° であり、それに合わせて作成した持ち替え・持ち直し操作を用いる。

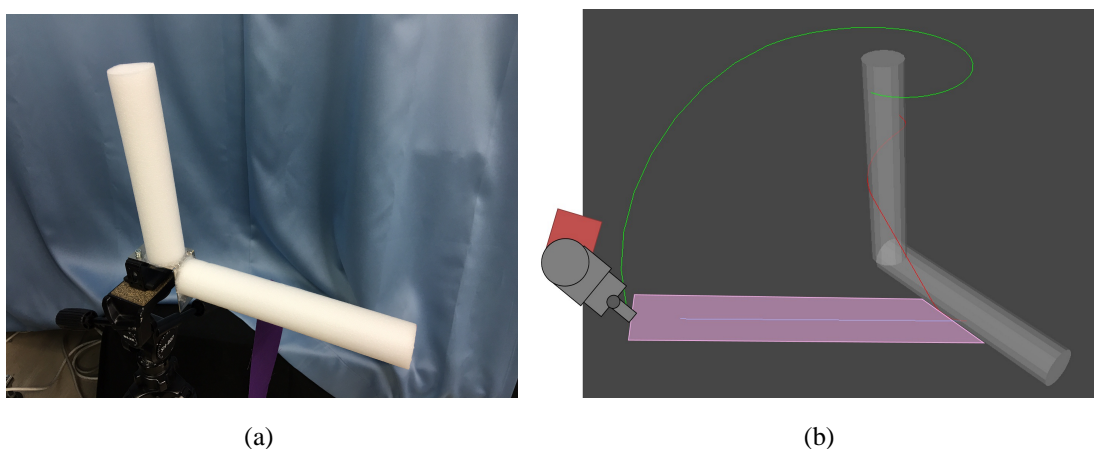


Fig. 4.35: 実験環境 (a) L 字管 (b) 目標線と生成された手先経路

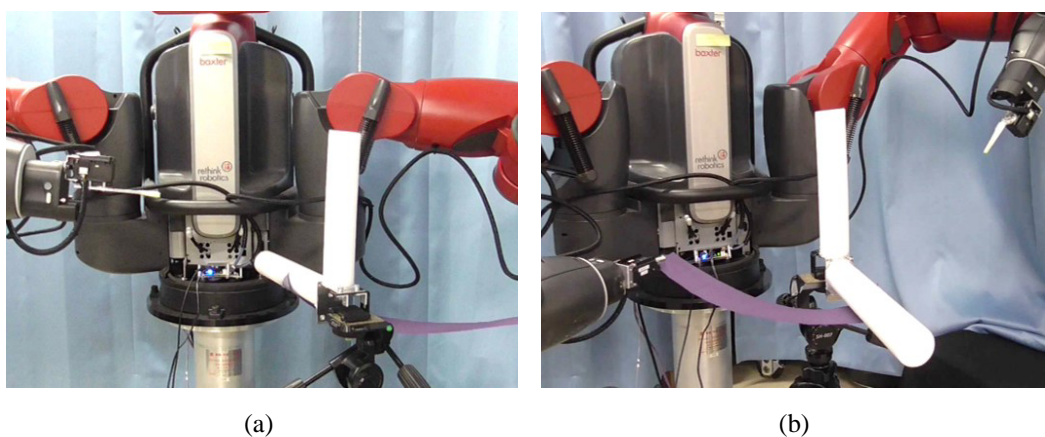
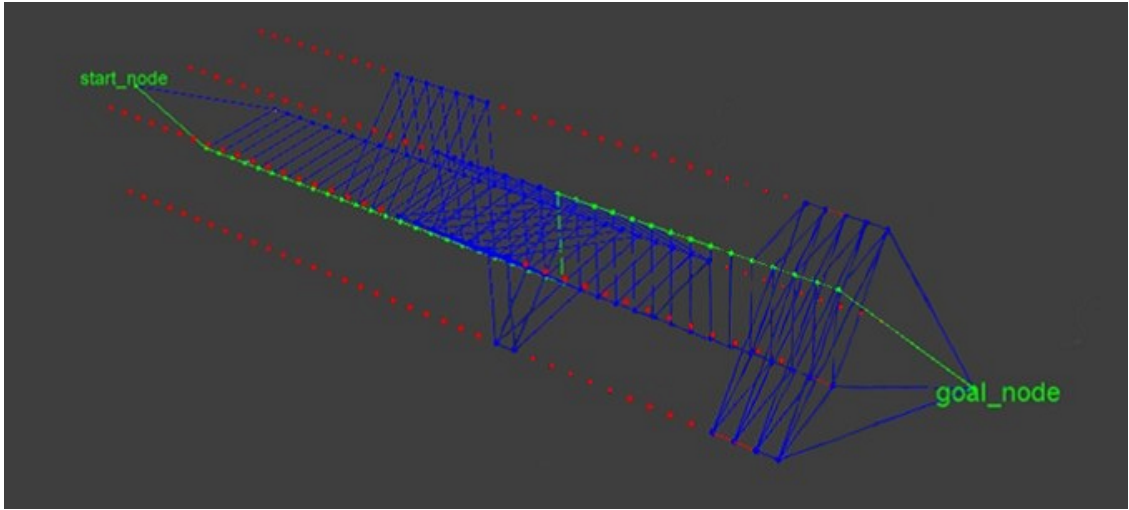


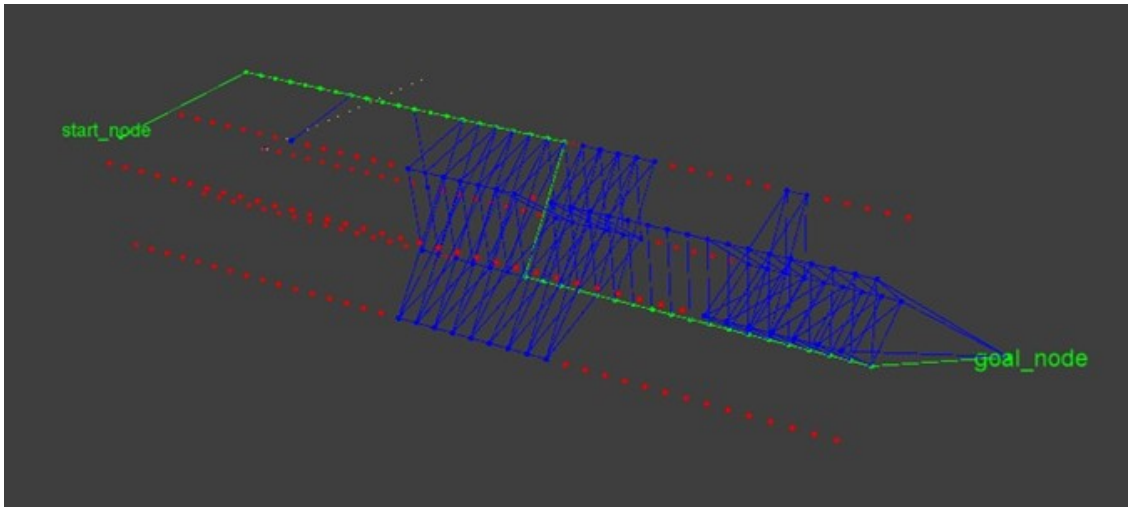
Fig. 4.36: ロボットに対する L 字管の向き (a) パターン 1 (b) パターン 2

これらの条件を用いて、L字管への被覆作業のロボット動作の計画を行った。結果として、L字管へ同じ布の巻き方をする手先経路でも、ロボットに対するL字管の向きを変えることにより、違うパターンの動作計画が行われた。実際に2パターンのグラフ探索の結果をFig. 4.37に示す。それぞれ、グラフ探索1回目で確実性が高く、かつ、IKが解けて実際に実行できる動作の経路を発見した。この探索結果を用いて生成したロボット動作について、実機実験を行った。実機で持ち替え操作を行いながら巻いた結果について述べる。パターン1 (Fig. 4.37(a)) の操作中の様子をFig. 4.38, 結果をFig. 4.40に示す。パターン1の場合、左手で布把持姿勢 45° で掴んで巻きはじめ、途中で右手に布把持姿勢 45° に持ち替えを行い、巻き付け終えた。パターン2 (Fig. 4.37(b)) の操作中の様子をFig. 4.39, 結果をFig. 4.41に示す。パターン2の場合、右手で布把持姿勢 0° で掴んで巻きはじめ、途中で左手に布把持姿勢 45° に持ち替えを行い、巻き付け終えた。それぞれ、ロボットに対するL字管の向きに合わせてロボット動作を生成し、実際に作業を成功することができた。このように、同じ手先経路でもロボットとの向きに合わせて、巻きやすい布の把持角度を見つけ、行いやすい手先経路上の位置で持ち替え動作を実行した。その持ち替え動作は、持ち替え後、続けて布を巻く時に、ハンドが巻きやすい姿勢になるような把持姿勢を選択した。

今回の場合、 $N = 39, D = 3, H = 2$ のサイズのグラフで、 $c_{\text{forward}} = 1$, $c_{\text{inter}} \simeq 100 \sim 200$, $c_{\text{intra}} \simeq 50 \sim 100$ というパラメータになった ($c_{\text{inter}}, c_{\text{intra}}$ それぞれの計算量に範囲があるのは、布とロボットの向きにより持ち替え・持ち直し操作が変わるためである)。これらを式(4.14, 4.15, 4.16)に代入すると、全ての手先経路を進む動作エッジに必要な計算量 $C_{\text{inter}} = 234$, それに対し、全ての持ち替え操作エッジに必要な計算量 $C_{\text{inter}} = 351c_{\text{inter}}$, 全ての持ち直し操作エッジに必要な計算量 $C_{\text{intra}} = 234c_{\text{intra}}$ となった。この結果から、初めからすべてのエッジのIK計算を行おうとした場合、持ち替え・持ち直しのIK計算量が手先経路を進む動作に必要なIK計算量と比べ、圧倒的に多くなってしまふことがわかる。このように提案手法では経路探索後に、必要な持ち替え・持ち直しエッジのIK計算のみをすることにより、計算量を少なくすることができた。実際、今回の実験のグラフ規模で全探索を行った場合、計算時間に数分以上必要とするが、提案手法の場合だと、数秒以内で動作計画を完了した。



(a)



(b)

Fig. 4.37: 経路計画の結果 (a) パターン 1 (b) パターン 2



Fig. 4.38: 巻き付け中の様子 (パターン1)

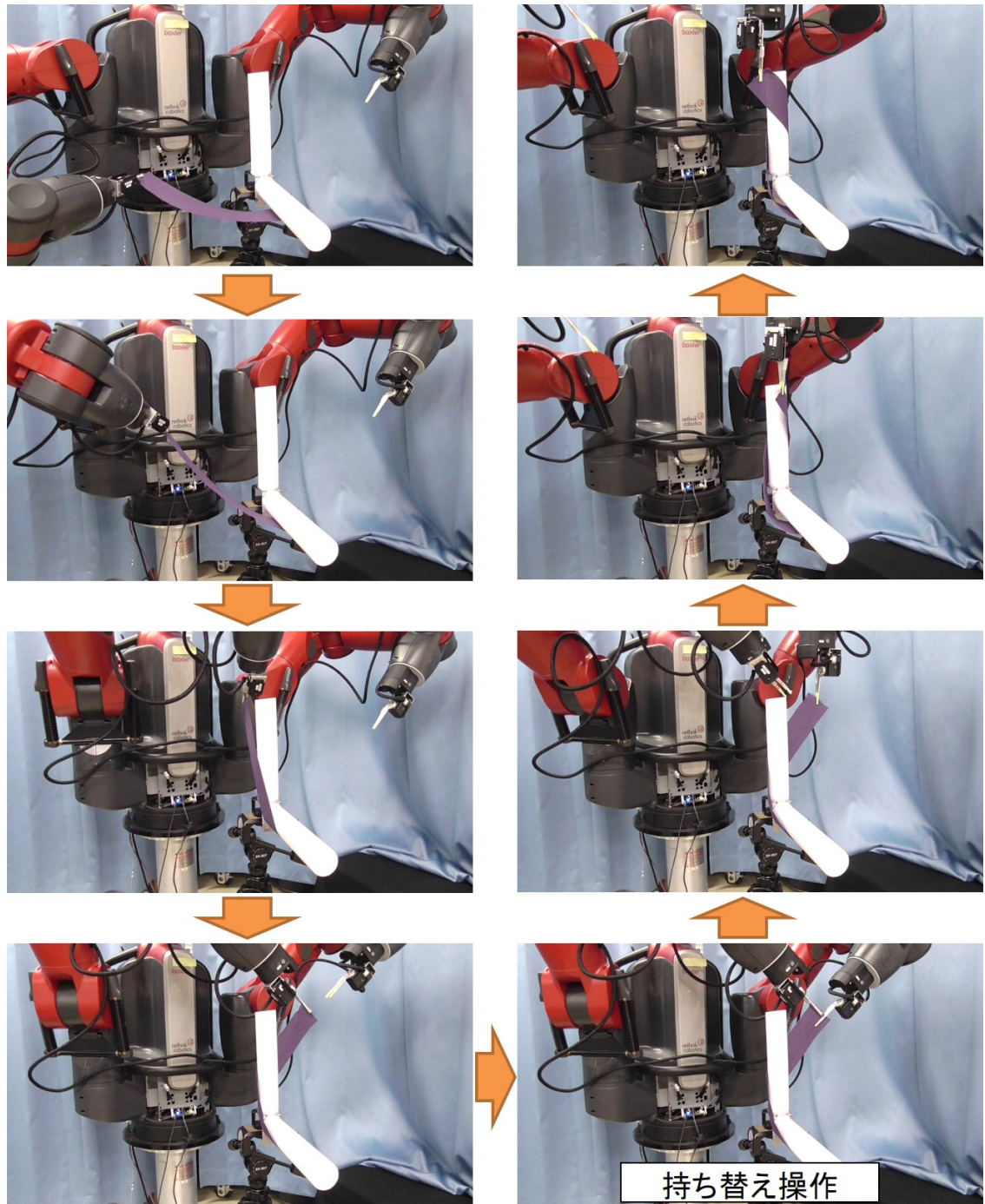
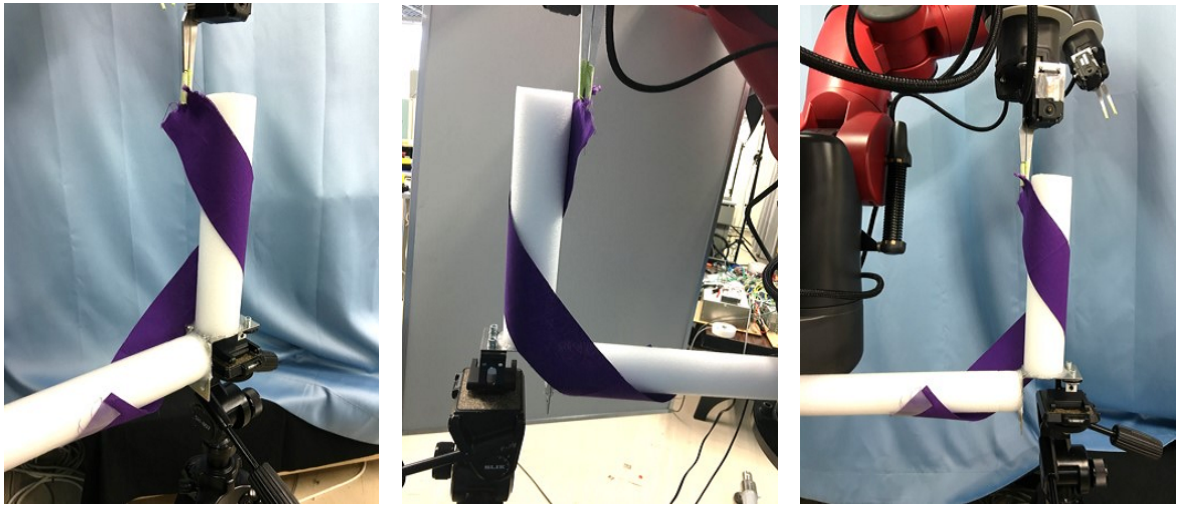


Fig. 4.39: 巻き付け中の様子 (パターン 2)



(a)

(b)

(c)

Fig. 4.40: 巻き付け結果 (パターン 1)



(a)

(b)

(c)

Fig. 4.41: 巻き付け結果 (パターン 2)

4.4 考察

本手法を用いた被覆実験 4.3 の結果のように、今回の目標である、覆うべきでない領域は避け、覆うべき領域に布を覆うという、被覆の本質的な作業を果たすことができた。ただし、実用的な被覆操作という観点から、綺麗に皺なく包装するといった作業を次に考える場合、実験結果には、布の伸び、弛みの影響による布の沈みや皺という課題が現れてくる。特に物体の凹部分で、フィットラインや目標線で計画される被覆領域に対し、布の沈みによる誤差が現れてくる。この誤差は凸面の形状や大きさだけでなく、重力方向や材質の違いも関わってくる。このような誤差を作業モデルのどの段階で吸収すべきかについて、本研究では、被覆の完成形や手先経路生成の段階ではなく、実際にロボットが動作する段階で行うべきであると考え。この誤差を手先経路の調整で取り除けば、実用的な包装作業にまで達することができると思われる。

これら布の皺や弛みといった問題は、布の正確な力学モデルをもつことにより予測や追跡がある程度は可能であろうが、最終的には動作時に視覚・力覚を用いて布の状態を監視しながら適宜解消していくことが必要になると考えられる。こういった問題に関する先行研究としては、力覚を用いたテンション調整による柔軟物操作時のローカルな位置調整を行っている研究 [111,112] が挙げられる。これらの研究は視覚による布のセンシングとともに、力覚に基づく調整を合わせて操作を行っている。ここで人間が被覆を行う場合を考えてみると、多くの場合、使用する布と対象物体を見て事前に経路を計画して被覆動作を行っているが、その上で、事前に予測しづらい皺やたるみに対しては視覚や力覚のからのフィードバックによりその都度、経路を微調整している。これらを考えると、皺や弛みへの対応は、ローカルな動作修正として全体の作業計画とは独立に実装されるのが自然である。したがって、今後の研究で皺や弛みの問題に対処するために本手法を拡張する場合にも、本論文で示した動作生成の流れを根本的に変更するのではなく、ローカルな動作補正を本手法に追加する形で拡張してゆくことになろう。逆に、視覚・力覚を用いた補正動作生成の観点から見ても、全体的な作業計画がある上でのローカルな調整としてアルゴリズムを構築する方が、よりの確な視覚・力覚フィードバックを実現できると期待できる。

4.5 まとめ

本章では、目標線から布を動かすための手先経路を生成する方法と、手先経路からロボット動作を生成する方法について述べた。手先経路生成方法では、目標線と布の把持点に合わせて、適切な布の動かし方が生成出来ることを述べた。ロボット動作生成方法では、手先経路とロボットに合わせて、適切なロボットの動作が生成出来ることを述べた。その中では、各操作の確実性に基づき生成されたグラフを用いて、最適な持ち替えや持ち直し操作の組み合わせが計画できることを述べた。実験では実際の双腕ロボットを用い、目標線から手先経路、ロボット動作を生成し、曲面物体へ被覆作業できることを示した。また、L字パイプへの巻き付け実験では、パイプの向きに合わせて、持ち替え操作を組合せた最適なロボット動作を生成し、作業を達成した。

第5章 結言

本論文では、ロボットによる布被覆作業の実現を目指し、三階層から成る被覆作業記述の枠組みを提案した。

第2章では、本論文が提案した目標線を中心とする被覆作業モデルの概要について述べた。まず、人間が被覆作業の教示に用いる大まかな指示の概要と、それが直感的な被覆作業教示に有効であることについて述べた。次に、CG分野で用いられる目標線について、これがロボットの被覆作業の記述に有効であることを述べた。また、この目標線を凹物体上に引く時の凹凸処理について、被覆に適する局所凸という概念を提案した。最後に、それらを組み合わせた、人間の大まかな指示から実際のロボット動作までが三階層で表現された被覆作業モデルについて述べた。

第3章では、大まかな指示を用いて直感的に被覆作業を表現する方法について述べた。提案教示手法は教示デバイスを用いることにより、大まかな指示から被覆操作の意図を抽出し、目標線として記述することを実現した。教示手法の中では、大まかな指示を解釈するための手振れと物体の凹凸考慮の問題を挙げ、目標線への手振れの影響を補正する方法と、第2章で述べた被覆に適した凸包領域（局所凸）の生成方法について述べた。実験では、提案手法が手振れを考慮しながら人間の大まかな指示を解釈し、被覆作業を目標線として記述、実行できることを示した。その中で、凹凸のある物体への被覆教示実験では、布の形状から埋めべき凹凸を考慮して目標線を生成し、提案した凹凸処理方法の効果を示した。

第4章では、目標線からロボットの動作を生成する方法について述べた。まず、目標線と布の把持点から自動的に手先経路を生成する手法について述べた。その中では、生成された手先経路を適切に補正されることについて述べた。実際の双腕アームロボットを用いた実機実験では、曲面物体などへ被覆操作や複数の目標線を用いた平包み操作が行えることを示し

た。次に、ロボットアームの可動範囲や手先の回転角の制約等を考慮し、動作中の布の把持姿勢の決定や、布の持ち替えや持ち直し操作を最適な位置で行う動作計画手法について述べた。その中では、操作のしやすさの重み評価を基に生成したグラフから、ロボット動作を生成することを述べた。また、IK 計算を組み合わせた探索アルゴリズムについて説明し、計算量が減らせることを述べた。実際の双腕アームロボットを用いたL字管への巻き付け実験では、L字管の向きに合わせて計画したロボット動作により巻き付け作業を成功させ、動作計画手法の有効性を示した。

以上、本研究では、物体を布で包むという被覆作業について、ロボット化のための階層的被覆作業モデルを提案した。提案したモデルを用いて、大まかな指示という直感的な教示方法から、目標線を用いて被覆作業の記述を行い、そこから最適な実機ロボットの動作を生成し、ロボットによる被覆作業を実現した。

本研究の成果が様々な布認識技術、シミュレーション技術と結び付き、より精確な被覆作業が行えるようになることを期待する。将来課題としては、風呂敷包みのような被覆作業を考えた時、やり方によっては、物体を押さえる、物体を転がしながら巻く、布の一部を折りたたむ、絞る、さらには布を固定するために、布を紐のように結ぶといった操作が組み合わされている。例えば、被覆指示を行った後に、物体を押えて包むべきか、それとも物体を転がしながら転がすべきか、完成形までの最適な達成方法を判断し、それに合わせた動作を実行すべきであると考え。今後、様々な被覆作業を自動化するためには、このような操作についてもロボットレベルの動作としてモデル化する必要がある。これらを通じて、人間でしかできなかった、或いは効率的にできなかった被覆作業がロボット化され、工場や一般家庭といった様々な環境に普及していくことを願う。また、本研究の記述モデルが、被覆以外の柔軟物操作のモデル化において、知見となることを期待する。

5.1 謝辞

本研究を進めるにあたり、様々な視点から多くのご助言やご指導を頂いた工藤俊亮准教授ならびに末廣尚士教授に感謝の意を表します。先生方には、修士から公私ともに本当にお世話になりました。本研究をこのような形で築き上げる事ができましたのはひとえに工藤先生のご指導によるものです。研究生活・日常生活で終始暖かい激励とご鞭撻を頂き、本当にありがとうございました。末廣先生には、日頃から新鮮で鋭いご助言、ご指導を頂き、研究者としての視点というものを学ばさせて頂きました。6年間、大変お世話になり、深く感謝しております。

つくばチャレンジ等の研究指導だけでなく、大学院生としての遊び歩き方を教えてくださった電気通信大学(現:防衛大学校)の富沢哲雄助教に感謝の意を表します。修士研究やインターンで東京大学(現:マイクロソフトリサーチアジア)の池内克史名誉教授には大変お世話になりました。様々な研究の世界を見させて頂き、感謝の意を表します。また、研究者としての渡り歩き方を教えてくださった知能システム学講座の布施哲治准教授、現:東海大学の高山佳久准教授に感謝の意を表します。修士・博士研究で多くのご助言を頂いた産業技術総合研究所の中岡慎一郎様、音田弘様に感謝の意を表します。そして、博士研究テーマのヒントとなるご講演をしてくださったエジンバラ大学の幸村琢准教授に感謝の意を表します。

東京大学の佐藤啓宏様、岡元崇紘様、小川雅也君には研究のみならず、学生生活で修士からお世話になりました。特に佐藤様にはインターン、中国での共同生活等、大変お世話になりました。博士課程の先輩である平井雅尊氏様、村松聡様、竹中秀樹様、TRINH VAN VINH様には研究相談に加え、博士進学、進路選択等で大変お世話になりました。研究室同期の松田啓明君には楽しい研究室生活のみならず、ハードウェア等、研究面でも大変お世話になりました。この場で改めて感謝したいと思います。また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた講座の学生の皆様に感謝の意を表します。特に滝澤優君、岩瀬元君にはお世話になりました。研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます。そして、父や母をはじめとした家族にも感謝します。

皆様のおかげで，楽しい思い出ばかりで大変ながらも，幸せな研究生生活を送ることが出来ました．本当にありがとうございました．

参考文献

- [1] 原田 研介, “マニピュレーション研究：把持計画を中心とした研究動向”, 日本ロボット学会誌, vol.31, no.4, pp.320–325, 2013.
- [2] 原田 研介, “ロボットの動作計画における最適化”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.6, pp.508–511, 2014.
- [3] Allison M. Okamura, Niels Smaby, Mark R.Cutkosky , “An overview of dexterous manipulation”, International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.255–262, 2000.
- [4] Antonio Bicchi, “Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping : a Difficult Road Toward Simplicity”, Transactions on Robotics and Automation, vol.16, no.6, pp.652–662, 2000.
- [5] Antonio Bicchi, Vijay Kumar, “Robotic Grasping and Contact : A Review”, International Conference on Robotics and Automation, pp.348–353, 2000.
- [6] 山田悦子, 岡本寛治: 風呂敷つつみ A Complete Guide to Furoshiki. バナナブックス, 2011.
- [7] Car Wrap (<http://www.carconversions.nl>), (2016年7月現在)
- [8] 動画でわかる！看護技術:包帯法 (<https://www.kango-roo.com>), (2016年7月現在)
- [9] 初めての介護教室 (<http://kaigo.osweb.jp>), (2016年7月現在)
- [10] Stephen Miller, Mario Fritz, Trevor Darrell, Pieter Abbeel, “Parametrized Shape Models for Clothing”, International Conference on Robotics and Automation, pp.4861–4868, 2011.

- [11] Christof Elbrechter, Robert Haschke, Helge Ritter, “Bi-Manual Robotic Paper Manipulation Based on Real-Time Marker Tracking and Physical Modelling”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1427–1432, 2011.
- [12] Jan Stria, Daniel Prusa, Vaclav Hlavac, Libor Wagner, Vladimir Petrik, Pavel Krsek, Vladimir Smutny, “Garment perception and its folding using a dual-arm robot”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.61–67, 2014.
- [13] Kimitoshi Yamazaki, Kotaro Nagahama, Masayuki Inaba, “Daily Clothes Observation from Visible Surfaces Based on Wrinkle and Cloth-Overlap Detection”, IAPR Conference on Machine Vision Applications, pp.275–278, 2011.
- [14] John Schulman, Alex Lee, Jonathan Ho and Pieter Abbeel, “Tracking Deformable Objects with Point Clouds”, International Conference on Robotics and Automation, pp.1130–1137, 2013.
- [15] Yinxiao Li, Yan Wang, Michael Case, Shih-Fu Chang, Peter K. Allen, “Real-time Pose Estimation of Deformable Objects Using a Volumetric Approach”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1046–1052, 2014.
- [16] Yinxiao Li, Danfei Xu, Yonghao Yue, Yan Wang, Shih-Fu Chang, Eitan Grinspun, Peter K. Allen, “Regrasping and Unfolding of Garments Using Predictive Thin Shell Modeling”, International Conference on Robotics and Automation, pp.1382–1388, 2015.
- [17] Li Sun, Gerardo Aragon-Camarasa, Simon Rogers, J. Paul Siebert, “Accurate garment surface analysis using an active stereo robot head with application to dual-arm flattening”, International Conference on Robotics and Automation, pp.185–192, 2015.
- [18] Ioannis Mariolis, Georgia Peleka, Andreas Kargakos, Sotiris Malassiotis, “Pose and category recognition of highly deformable objects using deep learning”, International Conference on Advanced Robotics, pp.655–662, 2015.

- [19] Arnau Ramisa , Guillem Alenyà , Francesc Moreno-noguer , Carme Torras, “Using depth and appearance features for informed robot grasping of highly wrinkled clothes”, International Conference on Robotics and Automation, pp.1703–1708, 2012.
- [20] Pol Monso, Guillem Alenyà , Carme Torras, “POMDP approach to robotized clothes separation”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1324–1329, 2012.
- [21] B. Willimon, I. Walker, and S. Birchfield, “A new approach to clothing classification using mid-level layers”, International Conference on Robotics and Automation, pp.4271–4278, 2013.
- [22] Kazuyuki Nagata, Natsuki Yamanobe, “Picking up a Towel by Cooperation of Functional Finger Actions”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1785–1790, 2009.
- [23] 小野 栄一, 喜多 伸之, 坂根 茂幸, “視触覚を用いた輪郭情報に基づく折れ重なった布生地 of 展開”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.2, pp.275–283, 1997.
- [24] Yasuyo Kita, Fuminori Saito, Nobuyuki Kita, “A deformable model driven visual method for handling clothes”, International Conference on Robotics and Automation, pp.3889–3895, 2004.
- [25] Christian Bersch, Benjamin Pitzer, Soren Kammel, “Bimanual robotic cloth manipulation for laundry folding”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1413–1419, 2011.
- [26] Andreas Doumanoglou, Andreas Kargakos, Tae-Kyun Kim, Sotiris Malassiotis, “Autonomous Active Recognition and Unfolding of Clothes using Random Decision Forests and Probabilistic Planning”, International Conference on Robotics and Automation, pp.987–993, 2014.

- [27] 和田隆広, 平井慎一, 川村貞夫, “伸縮柔軟物体上の複数点の間接的同時位置決め作業の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2, pp.282–290, 1999.
- [28] 和田隆広, 平井慎一, 川村貞夫, “面状伸縮柔軟物体上の複数点の間接的同時位置決め作業の解析とプランニング”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, pp.675–682, 2000.
- [29] Stephen Miller, Jur van den Berg, Mario Fritz, Trevor Darrell, Ken Goldberg, Pieter Abbeel, “A Geometric Approach to Robotic Laundry Folding”, International Journal of Robotics Research, vol.31, no.2, pp.249–267, 2012.
- [30] Jur van den Berg, Stephen Miller, Ken Goldberg, Pieter Abbeel, “Gravity-Based Robotic Cloth Folding”, International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, pp.409–424, 2010.
- [31] Yinxiao Li, Yonghao Yue, Danfei Xu, Eitan Grinspun, Peter K. Allen, “Folding deformable objects using predictive simulation and trajectory optimization”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.6000–6006, 2015.
- [32] Yuji Yamakawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa, “Motion Planning for Dynamic Folding of a Cloth with Two High-speed Robot Hands and Two High-speed Sliders”, International Conference on Robotics and Automation, pp.5486–5491, 2011.
- [33] Yuji Yamakawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa, “Dexterous manipulation of a rhythmic gymnastics ribbon with constant, high-speed motion of a high-speed manipulator”, International Conference on Robotics and Automation, pp.1896–1901, 2013.
- [34] Yinxiao Li, Xiuhan Hu, Danfei Xu, Yonghao Yue, Eitan Grinspun, Peter Allen, “Multi-Sensor Surface Analysis for Robotic Ironing”, International Conference on Robotics and Automation, pp.5670–5676, 2016.
- [35] ランドロイド (<https://laundroid.sevendreamers.com/>), (2016年7月現在)

- [36] FoldiMate (<https://www.foldimate.com/>), (2016年7月現在)
- [37] Hidetsugu Terada, Kazuyuki Yagata, “Motion Planning Approach of a Multi-Robot System for Furoshiki" Wrapping Operation”, Journal of the Japan Society of Precision Engineering vol.76, no.5, pp.546–551, 2010.
- [38] Ryosuke Oya, Kotaro Nagahama, Kenji Miyake, Kimitoshi Yamazaki, Kei Okada, Masayuki Inaba, “Dressing assistance with failure recovery actions based on cloth states recognition”, The Robotics and Mechatronics Conference, 2A2-Q13, 2013.
- [39] Tomoya Tamei, Takamitsu Matsubara, Akshara Rai, Tomohiro Shibata, “Reinforcement Learning of Clothing Assistance with a Dual-arm Robot”, International Conference on Humanoid Robots, pp.733–738, 2011.
- [40] Takeo Igarashi, John F. Hughes, “Clothing Manipulation”, ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.91–100, 2002.
- [41] He Wang, Taku Komura, “Manipulation of Flexible Objects by Geodesic Control”, Computer Graphics Forum, vol.31, no.2, pp.499–508, 2012.
- [42] Christian Smith, Yiannis Karayiannidis, Lazaros Nalpantidis, Xavi Gratal, Peng Qi, Dimos V. Dimarogonas, Danica Kragic, “Dual Arm Manipulation—A Survey”, Robotics and Autonomous Systems, vol.60, pp.1340-1353, 2012.
- [43] ベルメゾンギフト (<http://www.bellemaison.jp>), (2016年7月現在)
- [44] クリスタル彫刻工房 (<http://www.crystal-kobo.net/>), (2016年7月現在)
- [45] 羽根田 治： 結び方全書—暮らしに使える 170 の結び. 池田書店, 2009.
- [46] Duncan McCallum, David Avis, “A linear algorithm for finding the convex hull of a simple polygon”, Information Processing Letters, vol.9, issue.5, pp.201–206, 1979.

- [47] Franco P. Preparata, Se June Hong. “Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions”, *Communications of the ACM*, vol.20, no.2, pp.87–93, 1977.
- [48] Mingcen Gao, Thanh-Tung Cao, Tiow-Seng Tan, Zhiyong Huang, “Flip-flop: convex hull construction via star-shaped polyhedron in 3D”, *ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pp.45–54, 2013.
- [49] Donald R. Chand, Sham S. Kapur, “An algorithm for convex polytopes”, *Journal of the ACM*, vol.17, no.1, pp.78–86, 1970.
- [50] Ronald L. Graham, “An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set”, *Information Processing Letters*, vol.1, no.4, pp.132–133, 1972.
- [51] R.A. Jarvis, “On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane”, *Information Processing Letters* vol.2, no.1, pp.18–21, 1973.
- [52] F. P. Preparata, S. J. Hong., “Convex hulls of finite sets of points in two and three dimensions”, *Communications of the ACM*, vol.20, no.2 pp.87–93, 1977.
- [53] A. M. Andrew, “Another Efficient Algorithm for Convex Hulls in Two Dimensions”, *Information Processing Letters*. vol.9, no.5, pp.216–219, 1979.
- [54] Ronald L. Graham, F. Frances Yao, “Finding the convex hull of a simple polygon”, *Journal of Algorithms*, vol.4 no.4, pp.324–331, 1983.
- [55] Timothy L. Kay, James T. Kajiya, “Ray tracing complex scenes”, *ACM Siggraph Computer Graphics*, vol.20, no.4, pp.269–278, 1986.
- [56] Nancy M. Amato, Franco P. Preparata, “A Time-Optimal Parallel Algorithm for 3D Convex Hulls”, *Algorithmica*, vol.14, no.2, pp.169–182, 1993.
- [57] Timothy M. Chan, “Optimal output-sensitive convex hull algorithms in two and three dimensions”, *Discrete & Computational Geometry*, vol.16, no.4, pp.361–368, 1996.

- [58] C. Bradford Barber, David P. Dobkin, and Hannu Huhdanpaa, “The quickhull algorithm for convex hulls”, *ACM Transactions on Mathematical Software*. vol.22, no.4, pp.469–483, 1996.
- [59] Han- Ming Chen, Tzung- Han Lin, “An algorithm to build convex hulls for 3- D objects”, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol.29, no.6, pp.945-952, 2006.
- [60] Ladislav Kavan, Ivana Kolingerova, Jiri Zara, “Fast approximation of convex hull”, *International conference on Advances in computer science and technology*, pp.101–104, 2006.
- [61] Yun-Hui Liu, Miu-Ling Lam, Dan Ding, “A complete and efficient algorithm for searching 3-D form-closure grasps in the discrete domain”, *Transactions on Robotics*, vol.20, no.5, pp.805–816, 2004.
- [62] Jens Gregor, “Data-driven problem reduction for image reconstruction from projections using gift wrapping”, *Transactions on Nuclear Science*, Vol.58, no.3, pp.724–729, 2011.
- [63] Esa Rahtu, Mikko Salo, and Janne Heikkilä, “A new convexity measure based on a probabilistic interpretation of images”, *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.28, no.9, pp.1501–1512, 2006.
- [64] Zhouhui Lian, Afzal Godil, Paul L. Rosin, Xianfang Sun, “A New Convexity Measurement for 3D Meshes”, *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.119–126, 2012.
- [65] Henrik Zimmer, Marcel Campen, Leif Kobbelt, “Efficient Computation of Shortest Path-Concavity for 3D Meshes”, *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.2155–2162, 2013.
- [66] Bernard Marie Chazelle, “Convex decompositions of polyhedra”, *ACM symposium on Theory of computing*, pp.70–79, 1981.

- [67] Chandrajit Bajaj, and Tamal K. Dey, “Convex decomposition of polyhedra and robustness”, SIAM Journal on Computing, vol.21, no.2, pp.339–364, 1992.
- [68] Jyh-Ming Lien, Nancy M. Amato, “Approximate convex decomposition of polyhedra”, ACM Symposium on Solid and Physical Modeling, pp.121–131, 2007.
- [69] Robot Operating System (<http://www.ros.org>), (2016年7月現在)
- [70] Edsger W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs”, In Numerische Mathematik, vol.1, no.1, pp.269–271, 1959.
- [71] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, Bertram Raphael, “A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths”, Transactions on Systems Science and Cybernetics, vol.4, no.2, pp.100–107, 1968.
- [72] Richard Bellman, “On a routing problem”, Quarterly of Applied Mathematics, vol.16, no.1, pp.87–90, 1958.
- [73] Michael L. Fredman, Robert Endre Tarjan, “Fibonacci Heaps And Their Uses In Improved Network Optimization Algorithms”, Annual Symposium on Foundations of Computer Science, pp.338–346, 1984.
- [74] Michael L. Fredman, Robert Endre Tarjan, “Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms”, Journal of the ACM, vol.34, no.3, pp.596–615, 1987.
- [75] Maxim Likhachev, Geoff Gordon, Sebastian Thrun, “ARA*: Anytime A* search with provable bounds on sub-optimality”, Advances in Neural Information Processing Systems, 2003.
- [76] Benjamin Cohen, Sachin Chitta, Maxim Likhachev, “Search-based planning for manipulation with motion primitives”, International Conference on Robotics and Automation, pp.2902–2908, 2010.

- [77] Benjamin Cohen, Gokul Subramanian, Sachin Chitta, Maxim Likhachev, “Planning for Manipulation with Adaptive Motion Primitives”, International Conference on Robotics and Automation, pp.5478–5485, 2011.
- [78] Benjamin Cohen, Sachin Chitta, Maxim Likhachev, “Single-and dual-arm motion planning with heuristic search”, The International Journal of Robotics Research, vol.33, no.2, pp.305–320, 2014.
- [79] Lydia E Kavraki, Petr Švestka, Jean-Claude Latombe, Mark H Overmars, “Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces”, Transactions on Robotics and Automation, vol.12, no.4, pp.566–580, 1996.
- [80] James J. Kumer, Steven M. LaValle, “RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning”, International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.995–1001, 2000.
- [81] Robert Bohlin, Lydia E. Kavraki. “Path planning using lazy PRM”, International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.521–528, 2000.
- [82] Sertac Karaman, Emilio Frazzoli, “Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning”, International Journal of Robotics Research, vol.30, no.7, pp.846–894, 2011.
- [83] Sertac Karaman, Matthew R. Walter, Alejandro Perez, Emilio Frazzoli, Seth Teller, “Anytime motion planning using the RRT*”, International Conference on Robotics and Automation, pp.1478–1483, 2011.
- [84] Nathan Ratliff, Matthew Zucker, J. Andrew (Drew) Bagnell, Siddhartha Srinivasa, “CHOMP: Gradient optimization techniques for efficient motion planning”, International Conference on Robotics and Automation, pp.489–494, 2009.

- [85] Mrinal Kalakrishnan, Sachin Chitta, Evangelos Theodorou, Peter Pastor, Stefan Schaal, “STOMP: Stochastic Trajectory Optimization for Motion Planning”, International Conference on Robotics and Automation, pp.4569–4574, 2011.
- [86] Matthew Zucker, Nathan Ratliff, Anca Dragan, Mihail Pivtoraiko, Matthew Klingensmith, Christopher Dellin, J. Andrew Bagnell, Siddhartha Srinivasa, “CHOMP: Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning” International Journal of Robotics Research, 2013, vol.32, no.9-10, pp.1164–1193, 2013.
- [87] Ixchel G. Ramirez-Alpizar, Kensuke Harada, Eiichi Yoshida, “Motion planning for dual-arm assembly of ring-shaped elastic objects” International Conference on Humanoid Robots, pp.594–600, 2014.
- [88] Jean-Philippe Saut, Mokhtar Gharbi, Juan Cortés, Daniel Sidobre, Thierry Siméon, “Planning Pick-and-Place Tasks with Two-Hand Regrasping”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4528–4533, 2010.
- [89] Kensuke Harada, Tokuo Tsuji, Kazuyuki Nagata, Natsuki Yamanobe, Hiromu Onda, Yoshihiro Kawai, “Object placement planner for robotic pick and place tasks”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.980–985, 2012.
- [90] Kensuke Harada, Torea Foissotte, Tokuo Tsuji, Kazuyuki Nagat, Natsuki Yamanobe, Akira Nakamura, Yoshihiro Kawai, “Pick and Place Planning for Dual Arm Manipulators”, International Conference on Robotics and Automation, pp.2281–2286, 2012.
- [91] Weiwei Wan, Kensuke Harada, “Developing and Comparing Single-arm and Dual-arm Re-grasp”, Computing Research Repository, abs/1509.02302, 2015.
- [92] Nikolaus Vahrenkamp, Dmitry Berenson, Tamim Asfour, James Kuffner, Rüdiger Dillmann, “Humanoid Motion Planning for Dual-Arm Manipulation and Re-Grasping Tasks”, International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2464–2470, 2009.

- [93] Lillian Y. Chang, Siddhartha S. Srinivasa, Nancy S. Pollard, “Planning pre-grasp manipulation for transport tasks”, International Conference on Robotics and Automation, pp.2697–2704, 2010.
- [94] Daniel Kappler, Lillian Chang, Markus Przybylski, Nancy Pollard, Tamim Asfour, Rüdiger Dillmann, “Representation of pre-grasp strategies for object manipulation”, International Conference on In Humanoid Robots, pp.617–624, 2010.
- [95] Clemens Eppner, Oliver Brock, “Planning grasp strategies That Exploit Environmental Constraints”, International Conference on In Humanoid Robots, pp.4947–4952, 2015
- [96] 青村 茂, 植木 智大, 小柴 辰久, “双腕ロボットによる板金曲げ加工における持ち替え動作に関する研究”, 精密工学会誌, vol.78, no.6, pp.511-516, 2012.
- [97] 長谷川 泰久, 松野 順也, 福田 敏男, “寸法の異なる把持物体に対する適応持ち替え戦略”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.67, no.662, pp.3212–3218, 2001.
- [98] 小俣 透, 永田 和之, 岩槻 重伸, 柿倉 正義, “持ち替えによる多指ハンドの物体回転操作の計画”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.5, pp.751–758, 1994.
- [99] 高野 政晴, 永島 利明, 関 啓明, “指の腹による物体の把握と操りの運動学”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.83–90, 1996.
- [100] Akihiro Kawamura, Kenji Tahara, Ryo Kurazume, Tsutomu Hasegawa, “Simple orientation control of an object by regrasping using a dual-arm manipulator with multi-fingered hands”, International Conference on Advanced Robotics, pp.1–6, 2009.
- [101] Kenji Tahara, Keigo Maruta, Akihiro Kawamura, Motoji Yamamoto, “Externally sensorless dynamic regrasping and manipulation by a triple-fingered hand with torsional fingertip joints”, International Conference on Robotics and Automation, pp.3252–3257, 2012.

- [102] Phongtharin Vinayavekhin, Shunsuke Kudoh, Jun Takamatsu, Yoshihiro Sato, Katsushi Ikeuchi, “Representation and Mapping of Dexter-ous Manipulation through Task Primitives”, International Conference on Robotics and Automation, pp.3722–3729, 2013.
- [103] 相山 康道, 稲葉 雅幸, 井上 博允, “グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とピボット操作の実現” 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.114–121, 1996.
- [104] 沢崎 直之, 井上 博允, “多指ハンドによる物体の転がし操作”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.5, pp.560–571, 1991.
- [105] Matthew T. Mason, “Mechanics and Planning of Manipulator Pushing Operations”, International Journal of Robotics Research, vol.5, no.3, pp.53–71, 1986.
- [106] Kevin M. Lynch, Matthew T. Mason, “Stable Pushing: Mechanics, Controllability, and Planning”, International Journal of Robotics Research, vol.15, no.6, pp.533–555, 1996.
- [107] 栗栖 正充, 吉川 恒夫, “押し作業における対象物の軌道計画”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.8, pp.1115–1121, 1995.
- [108] 前田 雄介, 木地本 浩和, 太田 順, 相山 康道, 新井 民夫, “複数のロボット指による平面内グラスプレス・マニピュレーションの計画”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.8, pp.1010–1017, 2001.
- [109] Akansel Cosgun, Tucker Hermans, Victor Emeli, Mike Stilman, “Push Planning for Object Placement on Cluttered Table Surfaces”, International Conference on Robotics and Automation, pp.4627–4632, 2011.
- [110] Mehmet R. Dogar, Siddhartha S. Srinivasa, “A Framework for Push-grasping in Clutter”, Robotics: Science and Systemss VII, 2011.
- [111] Alex Lee, Henry Lu, Abhishek Gupta, Sergey Levine, Pieter Abbeel, “Learning Force-Based Manipulation of Deformable Objects from Multiple Demonstrations”, International Conference on Robotics and Automation, pp.177–184, 2015.

- [112] Adrià Colomé, Antoni Planells, Carme Torras, “A Friction-Model-Based Framework for Reinforcement Learning of Robotic Tasks in Non-Rigid Environments”, International Conference on Robotics and Automation, pp.5649–5654, 2015.

研究業績

1. 学術雑誌

- ・ 林直宏、富沢哲雄、工藤俊亮、末廣尚士、
「ロボットによる被覆操作のための教示方法」、
『日本ロボット学会誌』、vol.34、no.5、pp.340--351、2016.

2. 国際会議発表(口頭発表, 査読有り)

- ・ Naohiro Hayashi, Tetsuo Tomizawa, Takashi Suehiro, and Shunsuke Kudoh.
「Dual arm robot fabric wrapping operation using target lines」,
"Int'l Conf. on Robotics and Biomimetics ", pp.2185--2190, 2014.

3. 国内会議発表(口頭発表, 査読なし)

- ・ 林直宏、富沢哲雄、末廣尚士、工藤俊亮、
「双腕アームロボットによる物体への布巻付け操作」、
『日本ロボット学会学術講演会』、2P2-04、2014.

著者略歴

林 直宏 (はやし なおひろ)

1987年 11月 東京都に生まれる

2006年 3月 私立武蔵高等学校 卒業

2007年 4月 明治大学理工学部機械工学科 入学

2011年 3月 明治大学理工学部機械工学科 卒業

2011年 4月 電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報メディアシステム学専攻 博士前期課程 入学

2013年 3月 電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報メディアシステム学専攻 博士前期課程 修了

2013年 4月 電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報メディアシステム学専攻 博士後期課程 入学

2016年 12月 電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報メディアシステム学専攻 博士後期課程 修了

日本ロボット学会会員

IEEE (Robotics and Automation Society) 会員

